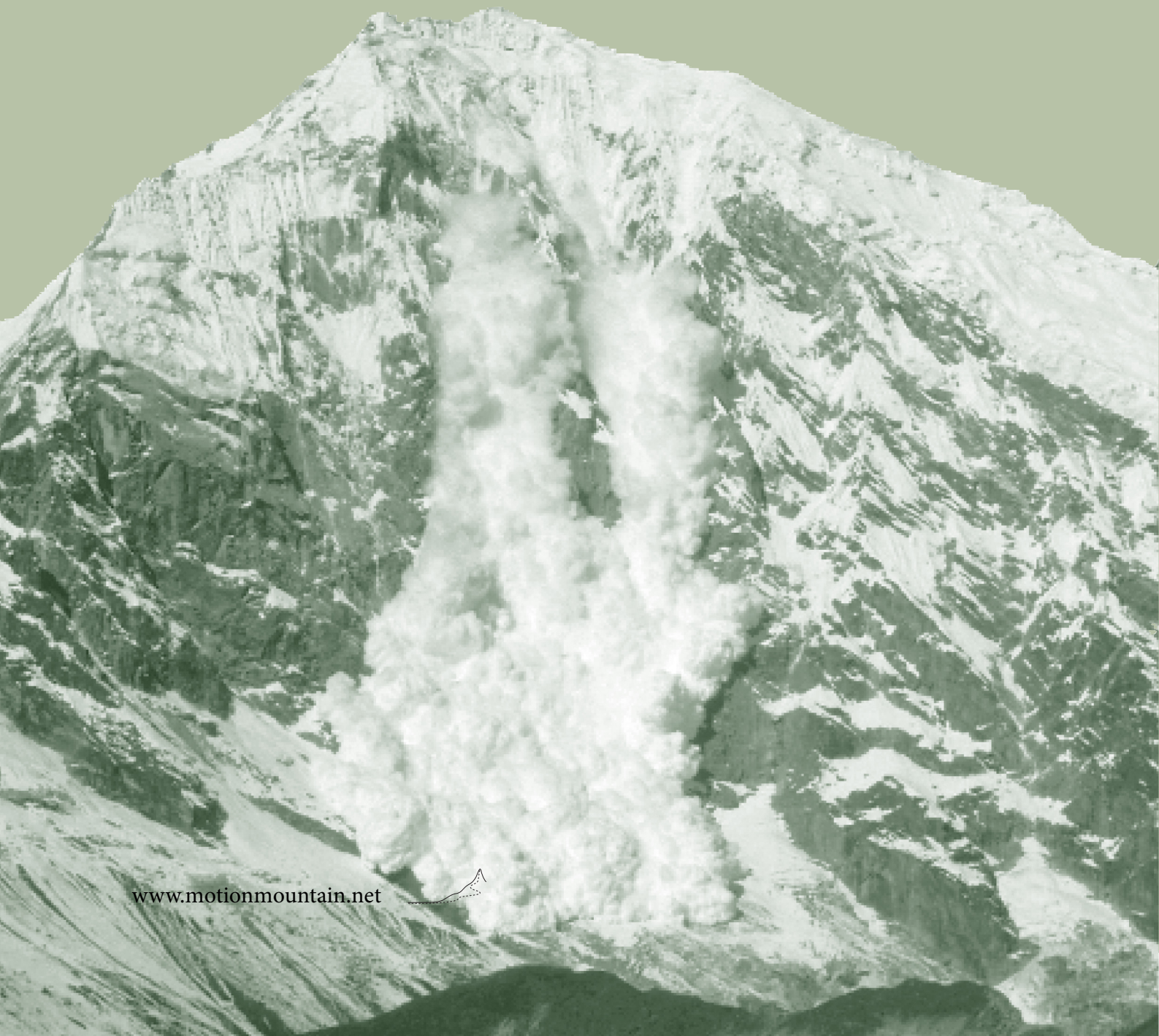
Christoph Schiller

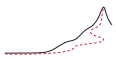
LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL. I

CHUTE, FLUX ET CHALEUR

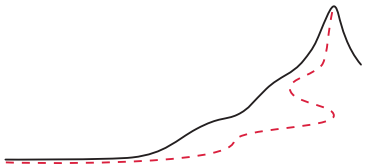


www.motionmountain.net



Christoph Schiller

La Montagne Mouvement



L'Aventure de la Physique
Volume I

Chute, Flux et Chaleur

Traduit de l'anglais par Benoît CLENET

23e édition, disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net

Editio vicesima tertia.

Proprietas scriptoris © Christophori Schiller
secundo anno Olympiadis vicesimae nonae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliquo, quod
partem horum verborum continet ; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Vingt-troisième édition.

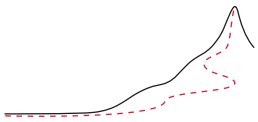
Copyright © 2009 Christoph Schiller,
deuxième année de la 29e Olympiade.

Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne
dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/deed.fr,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction,
distribution et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel*
produit ou service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée
sans le consentement écrit du détenteur du droit d'auteur.
Toute personne est libre de consulter, enregistrer et imprimer
ce fichier pdf pour son usage personnel, et de le diffuser par
des moyens électroniques, mais uniquement sous sa forme originale
et de manière entièrement gratuite.

À Britta, Esther et Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.



PRÉFACE

> « Primum movere, deinde docere*. »
>
> Antiquité

Ce livre s'adresse à toute personne curieuse de la nature et du mouvement. La curiosité portant sur la manière dont se meuvent les gens, les animaux, les choses, les images et l'espace nous entraîne dans de multiples aventures. Ce volume présente les meilleures d'entre elles dans le domaine du mouvement familier. L'observation du mouvement de tous les jours nous permet de déduire six propositions fondamentales : le mouvement quotidien est continu, conservé, relatif, réversible, invariant par réflexion, et... fainéant. Oui, la nature est vraiment paresseuse : dans chacun de ses mouvements, elle minimise le changement. Ce texte explore comment ces résultats sont déduits et comment ils s'accommodent de toutes les observations qui semblent les contredire.

La majorité des points de départ de la physique moderne, dont la structure est indiquée sur la Figure 1, est constituée des résultats issus du mouvement quotidien. Le présent volume – le premier d'une collection qui en compte six – propose un tour d'horizon de la physique ; il résulte d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990 : présenter le mouvement d'une manière simple, moderne et vivante.

Afin d'être *simple*, le texte se focalise sur les concepts, tout en donnant aux mathématiques le niveau minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules dans les calculs. Tout ce texte est à la portée d'un étudiant qui accède au premier niveau universitaire.

Afin d'être *moderne*, ce texte est enrichi par les nombreux joyaux – aussi bien théoriques qu'empiriques – qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *vivant*, ce texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale, ce devrait être comme assister à un spectacle de magie. Nous observons, nous nous étonnons, nous n'en croyons pas nos yeux, nous réfléchissons, et finalement nous comprenons le truc. Lorsque nous observons la nature, nous faisons souvent cette même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui mettra la sagacité du lecteur à l'épreuve. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise de ce texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre sur la pédagogie due à Hartmut von Hentig, se traduit ainsi : « Fortifier les hommes, clarifier les choses ». Clarifier les choses nécessite du courage, puisque changer les habitudes de pensée engendre la peur, souvent masquée par la colère. Mais en surpassant nos peurs

* « D'abord émouvoir, ensuite enseigner ». Dans les langues modernes, ce type mentionné de *mouvement* (celui du cœur) est souvent appelé *motivation* : ces deux termes sont issus de la même racine latine.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

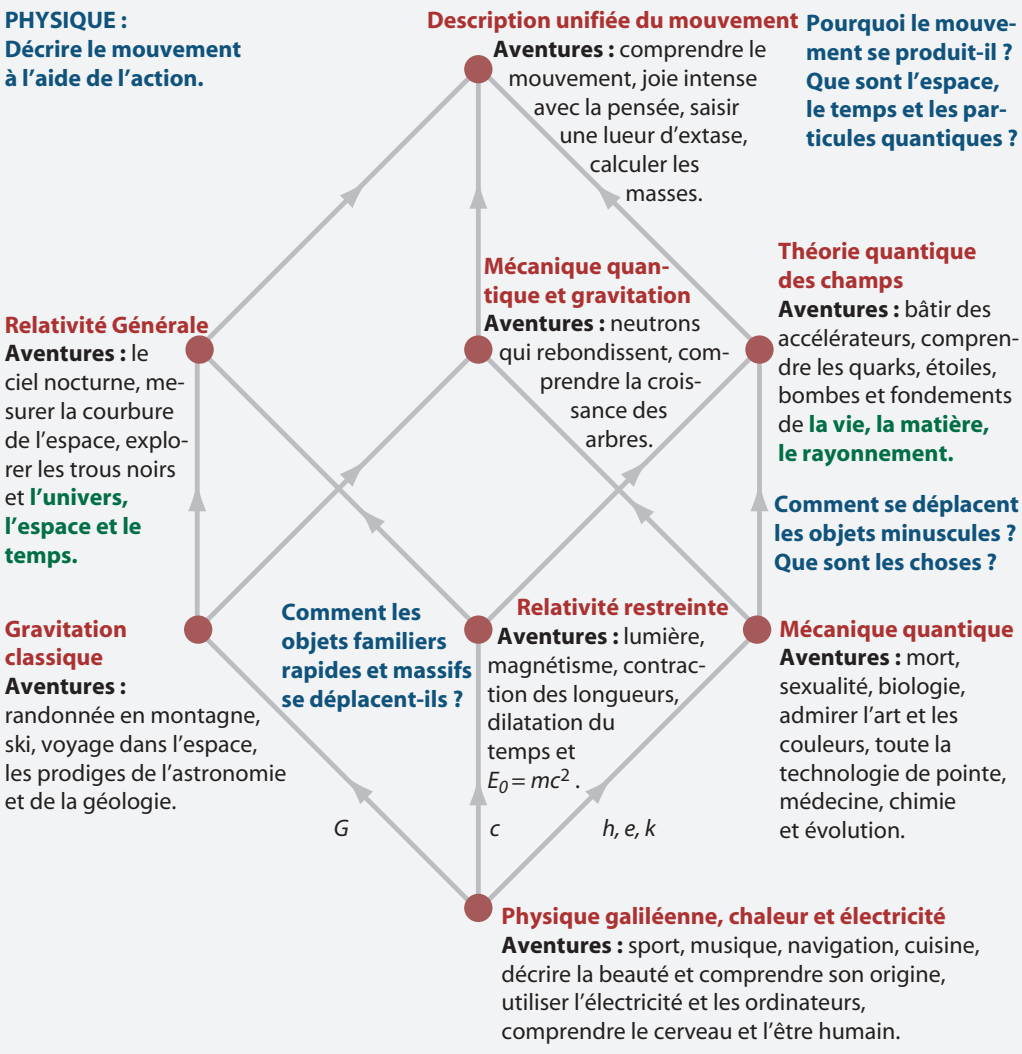


FIGURE 1 Une carte complète de la physique : les connexions sont définies par la vitesse de la lumière c, la constante de la gravitation G, la constante de Planck h, la constante de Boltzmann k et la charge élémentaire e.

nous gagnons en force. Nous ressentons alors des émotions intenses et enivrantes. Toutes les grandes aventures de la vie – et explorer le mouvement en est une – mènent à cela.

Munich, 10 Janvier 2009.

Remerciement

Je remercie Benoît Clénet pour sa traduction de ce volume. Sa patience, son énergie et son professionnalisme sont exemplaires.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Conseil au lecteur

D'après mon expérience d'enseignant, je connais une méthode d'apprentissage qui est toujours parvenue à transformer des élèves en échec en élèves gagnants : si vous lisez un livre pour l'étudier, résumez chaque section que vous lisez, *dans vos propres termes, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, lisez la section une nouvelle fois. Recommencez jusqu'à ce que vous puissiez résumer clairement ce que vous avez lu avec vos propres mots, à voix haute. Vous pouvez le faire tout seul dans votre chambre, ou avec des amis, ou tout en marchant. Si vous faites cela avec tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'apprentissage et de lecture de manière significative. De surcroît, vous prendrez beaucoup plus de plaisir à apprendre avec des bons ouvrages et détesterez nettement moins les mauvais manuels. Les prodiges de cette méthode peuvent même l'utiliser tout en écoutant un cours, à voix basse, évitant ainsi de prendre constamment des notes.

Comment utiliser ce livre ?

Le texte en vert, que l'on trouve dans un grand nombre de notes en marge, signale un lien sur lequel on peut cliquer dans un lecteur pdf. Ces liens en vert sont soit des références bibliographiques, des notes de bas de page, des références croisées vers d'autres pages, des solutions aux défis ou des pointeurs vers des sites Web.

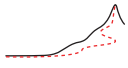
Les indices et solutions des *défis* sont donnés dans l'annexe. Les défis sont classés ainsi : niveau recherche (r), difficile (d), niveau étudiant standard (s) et facile (e). Les défis des types r, d ou s pour lesquels aucune solution n'a encore été incorporée dans le livre sont marqués (pe).

Appel à contribution

Ce texte est et demeurera librement téléchargeable depuis Internet. En échange, envoyez-moi s'il vous plaît un bref courriel à fb@motionmountain.net, à propos des questions suivantes :

— Qu'est-ce qui n'était pas clair ?
— Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris ?
Défi 1 s — Qu'est-ce qui devrait être amélioré ou corrigé ?

Vous pouvez également ajouter votre retour directement sur www.motionmountain.net/wiki. Au nom de tous les lecteurs, merci par avance pour votre collaboration. Si votre contribution est particulièrement pertinente, et si vous le souhaitez, votre nom sera mentionné dans les remerciements, ou bien vous recevrez une récompense, ou les deux. Mais par-dessus tout, très bonne lecture !



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

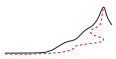


Table des Matières

14 1 Pourquoi s'intéresser au mouvement ?

Le Mouvement existe-t-il ? 15 • Comment devrions-nous parler du mouvement ? 17 • Quels sont les différents types de mouvements ? 19 • Perception, continuité et changement 23 • Le monde a-t-il besoin d'états ? 25 • Curiosités et défis amusants sur le mouvement 26

30 2 De la mesure du mouvement à la continuité

Qu'est-ce que la vitesse ? 31 • Qu'est-ce que le temps ? 32 • Pourquoi les horloges tournent-elles dans le sens des aiguilles d'une montre ? 38 • Est-ce que le temps s'écoule ? 38 • Qu'est-ce que l'espace ? 39 • L'espace et le temps sont-ils absolus ou relatifs ? 42 • La taille – pourquoi les surfaces existent-elles, mais pas les volumes ? 43 • Qu'est-ce qu'une ligne droite ? 47 • Une Terre creuse ? 48 • Curiosités et défis amusants sur l'espace et le temps quotidiens 49

57 3 Comment décrire le mouvement – la cinématique

Le jet et le tir 59 • Qu'est-ce que le repos ? 61 • Les objets et les particules ponctuelles 64 • Des jambes et des roues 67

70 4 Des objets et des images à la conservation

Mouvement et contact 71 • Qu'est-ce que la masse ? 72 • Le mouvement est-il éternel ? 79 • Appendice sur la conservation – l'énergie 81 • La vitesse est-elle absolue ? – La théorie de la relativité quotidienne 84 • La rotation 87 • Des roues en rotation 90 • Comment marchons-nous ? 91

94 5 De la rotation de la Terre à la relativité du mouvement

Comment la terre tourne-t-elle ? 99 • La Terre se déplace-t-elle ? 102 • La rotation est-elle relative ? 105 • Curiosités et défis amusants sur le mouvement quotidien 106 • Des jambes ou des roues ? – Suite 116

120 6 Dynamique due à la gravitation

Propriétés de la gravitation 123 • La dynamique – Comment les choses bougent-elles dans plusieurs dimensions ? 128 • La gravitation dans le ciel 129 • La Lune 131 • Les orbites 133 • Les Marées 136 • La lumière peut-elle tomber ? 139 • Qu'est-ce que la masse ? – Suite 140 • Curiosités et défis amusants sur la gravitation 142

155 7 La mécanique classique et la prédictibilité du mouvement

Devrait-on employer la force ? 156 • États complets – conditions initiales 162 • Les surprises existent-elles ? L'avenir est-il déjà tout tracé ? 164 • Une conclusion étrange sur le mouvement 168 • Descriptions générales du mouvement 168

173 8 Mesurer le changement avec l'action

Le principe de moindre action 177 • Pourquoi le mouvement est-il si souvent limité ? 182 • Curiosités et défis amusants sur les lagrangiens 186

189 9 Mouvement et symétrie

Pourquoi pouvons-nous réfléchir et discuter ? 189 • Points de vue 191 • Symétries et groupes 192 • Représentations 193 • Symétries, mouvement et physique galiléenne 196 • Reproductibilité, conservation et théorème de Noether 200 • Curiosités et défis amusants sur la symétrie du mouvement 205

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

206 10 Mouvements élémentaires des corps étendus – vibrations et ondes
Les ondes et leur mouvement 208 • Pourquoi pouvons-nous nous parler ? – Le principe de Huygens 214 • Signaux 215 • Ondes solitaires et solitons 217 • Curiosités et défis amusants sur les ondes et les corps étendus 220

227 11 Les corps étendus existent-ils ? – les limites de la continuité
Montagnes et fractales 227 • Une barre de chocolat peut-elle durer pour toujours ? 228 • À quelle hauteur les animaux peuvent-ils sauter ? 230 • Élagage d'arbres 230 • L'écho du silence 231 • Des petites billes dures 232 • Le mouvement des fluides 235 • Curiosités et défis amusants sur les fluides 238 • Curiosités et défis amusants sur les solides 244 • Qu'est-ce qui peut bouger dans la nature ? 247

250 12 De la chaleur à l'invariance temporelle
Température 250 • Entropie 254 • Courant d'entropie 256 • Les systèmes isolés existent-ils ? 257 • Pourquoi les ballons ont-ils besoin d'espace ? – La fin de la continuité 257 • Mouvement brownien 259 • Entropie et particules 261 • L'entropie minimale de la nature – le quantum d'information 263 • Pourquoi ne pouvons-nous pas nous souvenir du futur ? 264 • Est-ce que tout est fait de particules ? 265 • Pourquoi les pierres ne peuvent être ni continues ni fractales, ni faites de petites billes dures 267 • Curiosités et défis amusants sur la chaleur 268

275 13 Auto-organisation et chaos – l'élégance de la complexité
Curiosités et défis amusants sur l'auto-organisation 282

285 14 Des frontières de la physique aux limites du mouvement
Thèmes de recherche en dynamique classique 285 • Qu'est-ce que le contact ? 285 • Précision et exactitude 286 • Est-ce que toute la nature peut être décrite dans un livre ? 287 • Pourquoi la mesure est-elle possible ? 287 • Le mouvement est-il illimité ? 288

289 A Notation et conventions
L'alphabet latin 289 • L'alphabet grec 291 • Alphabet hébreu et autres écritures 293 • Chiffres et nombres 294 • Les symboles utilisés dans ce texte 295 • Calendriers 297 • Abréviations et éponymes ou concepts ? 299

300 B Unités, Mesures et Constantes
Unités naturelles de Planck 303 • Autres systèmes d'unités 305 • Curiosités et défis amusants sur les unités 306 • Précision et exactitude des mesures 312 • Constantes physiques fondamentales 313 • Nombres utiles 318

320 C Sources d'information sur le mouvement

327 Bibliographie

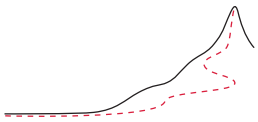
353 Indices et solutions des défis

391 Crédits
Remerciements 391 • Crédits filmographiques 392 • Crédits photographiques 392

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Chute, Flux et Chaleur

Dans notre apprentissage du mouvement des objets,
l'aventure de la randonnée et d'autres expériences
nous conduisent à introduire les concepts de
vitesse, temps, longueur, masse et température,
et d'en tirer parti pour mesurer le changement.
Nous découvrons comment flotter librement dans l'espace,
pourquoi nous avons des jambes au lieu de roues,
pour quelle raison le désordre ne peut être supprimé,
et pourquoi l'une des questions les plus ardues
de la science concerne l'écoulement de l'eau dans un tube.



Chapitre 1

POURQUOI S'INTÉRESSER AU MOUVEMENT ?

> « Tout mouvement est une illusion. »
>
> Zénon d'Élée*

Braoum ! L'éclair, frappant l'arbre situé à proximité, interrompt brutalement notre elle et paisible randonnée forestière : nos cœurs se mettent soudainement à battre plus rapidement. À la cime de l'arbre, nous voyons le feu apparaître une nouvelle fois, puis s'éteindre. Le léger vent agitant les feuilles autour de nous ramène ce lieu à son apaisement initial. À côté, l'eau d'une petite rivière suit son chemin tortueux vers le bas de la vallée, réfléchissant sur sa surface les silhouettes mouvantes des nuages.

Le mouvement est partout : amical et menaçant, terrible et magnifique. Il est fondamental pour notre existence humaine. Nous avons besoin du mouvement pour grandir, pour apprendre, pour penser et pour profiter de la vie. Nous utilisons le mouvement pour marcher à travers une forêt, pour écouter ses bruitages et pour parler de tout cela. Comme tous les animaux, nous comptons sur le mouvement pour chercher de la nourriture et pour survivre aux dangers. Comme tous les êtres vivants, nous avons besoin du mouvement pour nous reproduire, pour respirer et pour digérer les aliments. Comme pour tous les objets, le mouvement nous réchauffe.

Le mouvement est l'observation la plus fondamentale que nous puissions faire sur la nature en général. Cette remarque fait apparaître l'idée que *tout* ce qui se produit dans le monde est un certain type de mouvement. Il n'y a aucune exception. Le mouvement est une partie si fondamentale de nos observations que l'origine même du mot se perd dans l'obscurité de l'histoire linguistique indo-européenne. La fascination pour le mouvement a toujours fait de lui un objet favori de curiosité. Durant le cinquième siècle av. J.-C. dans la Grèce ancienne, son étude lui avait attribué un nom : la *physique*.

Réf. 1

Le mouvement est également important pour l'existence humaine. Qui sommes-nous ? D'où venons-nous ? Qu'allons-nous faire ? Que devrions-nous faire ? Qu'est-ce que nous réserve l'avenir ? D'où viennent les gens ? Où vont-ils ? Qu'est-ce que la mort ? D'où vient le monde ? Comment la vie est-elle apparue ? Toutes ces questions sont en rapport avec le mouvement. L'étude du mouvement fournit des réponses qui sont à la fois profondes et surprenantes.

Le mouvement est étrange. Bien qu'il soit omniprésent – dans les étoiles, dans les marées, dans nos paupières –, ni les penseurs antiques et ni les milliers d'autres qui se sont succédé depuis 25 siècles n'ont pu lever le voile sur le mystère central : *Qu'est-ce que le mouvement ?* Nous découvrirons que la réponse classique, « le mouvement est la

Réf. 3

* Zénon d'Élée (v. 450 av. J.-C.), fut un des principaux représentants de l'École éléatique de philosophie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

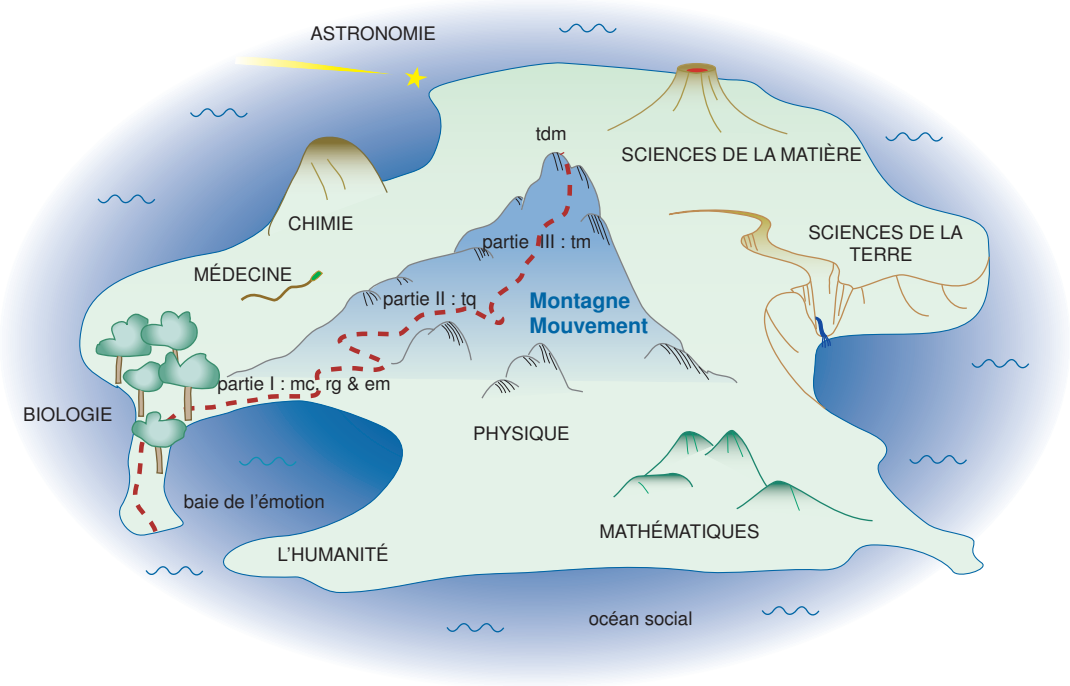


FIGURE 2 L'Île de l'Expérience, avec la Montagne Mouvement et la piste à suivre (mc : mécanique classique, rg : relativité générale, em : électromagnétisme, tq : théorie quantique, tm : théorie M, tdm : théorie du mouvement).

variation de la position dans le temps », est inappropriée. Ce n'est que récemment qu'une réponse a finalement été trouvée. Ceci est l'histoire du cheminement de cette découverte.

Le mouvement fait partie de l'expérience humaine. Si nous imaginons l'expérience humaine comme une île, alors le destin, représenté par les vagues de l'océan, nous a portés jusqu'à son rivage. Près du centre de l'île une montagne particulièrement haute émerge. Depuis son sommet nous pouvons survoler le paysage tout entier et avoir la sensation que toutes les expériences humaines ont un lien de parenté, en particulier les divers exemples de mouvement. Ceci est un guide vers le sommet de ce que j'ai nommé la Montagne Mouvement. Son parcours est une des plus belles aventures de l'esprit humain. Clairement, la première question à poser est :

LE MOUVEMENT EXISTE-T-IL ?

> « *Das Rätsel* gibt es nicht. Wenn sich eine Frage überhaupt stellen läßt, so *kann* sie beantwortet werden*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.5

Pour aiguiser l'esprit sur le problème de l'existence du mouvement, regardez la Figure 3 et suivez les instructions. Dans les deux cas les figures semblent tourner. Nous pouvons ressentir les mêmes effets lorsque nous marchons sur les pavés italiens en forme

Réf. 2

* *Le mystère* n'existe pas. Si une question peut être posée, alors elle *peut* trouver une réponse.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 3 Illusions du mouvement : regardez la figure de gauche et déplacez légèrement la page, ou regardez le point blanc au centre de la figure de droite et bougez votre tête d'avant en arrière.

de vagues ou lorsque nous jetons un œil sur les illusions de la page Web www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/. Comment pouvons-nous être sûrs que le mouvement réel est différent
Défi 2 s de ceux-ci ou d'autres illusions similaires ?*

Plusieurs savants ont simplement avancé que le mouvement n'existe pas du tout. Leurs
Réf. 4 arguments ont profondément influencé la recherche sur le mouvement. Par exemple, le philosophe grec Parménide (né vers 515 av. J.-C. à Élée, une petite ville près de Naples, dans le sud de l'Italie) a émis l'idée que, puisque rien ne peut provenir du vide, le changement ne peut pas exister. Il a mis l'accent sur la *constance* de la nature et a donc logi-
Réf. 5 quement affirmé que tout mouvement et donc tout changement est une illusion.

Héraclite (v. 540 à v. 480 av. J.-C.) a tenu le point de vue opposé. Il l'a exprimé dans sa célèbre expression πάντα ῥεῖ « panta rhei » ou « tout se meut sans cesse »**. Il imaginait le changement comme étant l'essence de la nature, contrairement à Parménide. Ces deux opinions également célèbres ont incité plusieurs savants à rechercher plus précisément si, dans la nature, il y a des quantités *conservées* ou si la *création* est possible. Nous découvrirons la réponse plus tard ; en attendant, vous pouvez méditer sur l'alternative
Défi 3 s que vous préférez.

Le collaborateur de Parménide, Zénon d'Élée (né vers 500 av. J.-C.), a débattu avec tant d'intensité contre le mouvement que certains ont toujours un doute à ce propos aujourd'hui. Dans un de ses arguments il prétendit – dans un langage simple – qu'il est impossible de gifler quelqu'un, étant donné que la main doit premièrement parcourir la moitié du trajet vers le visage, puis parcourir la moitié de la distance qu'il reste, puis encore une fois et ainsi de suite. Par conséquent, la main ne pourra jamais atteindre le visage. L'argument de Zénon se concentre sur le lien entre *l'infini* et son opposé, le fini, dans la description du mouvement. Dans la théorie quantique moderne, un sujet
Réf. 6 similaire préoccupe encore aujourd'hui des scientifiques.

Zénon a également affirmé qu'en observant un objet en mouvement durant un *court* instant, nous ne pouvons pas dire qu'il bouge. Zénon argumenta que, durant un court instant, il n'y a aucune différence entre un corps en mouvement et un corps au repos. Il en déduisit alors que, s'il n'y a pas de différence durant un court instant, il ne peut y en

* Les solutions des *défis* sont données soit à la page **??**, soit plus loin dans le texte. Les défis sont classés en : niveau approfondi (r), difficile (d), niveau étudiant normal (n) ou facile (e). Les défis qui n'ont pas encore de solution sont marqués (ny).

** L'Annexe A explique comment lire un texte grec.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

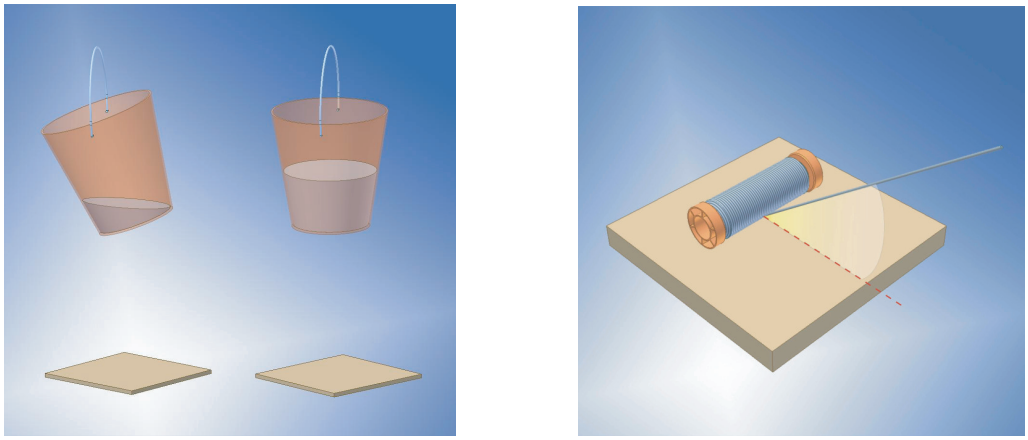


FIGURE 4 Combien faut-il d'eau pour faire en sorte que le seau soit suspendu verticalement ? À partir de quel angle la bobine tirée change-t-elle sa direction de mouvement ? (© Luca Gastaldi)

avoir non plus pour un temps plus long. Zénon a donc douté que le mouvement puisse clairement être distingué de son opposé, le *repos*. En réalité, dans l'histoire de la physique, les penseurs ont alterné plusieurs fois entre réponse positive et négative. Ce fut cette vraie question qui conduisit Albert Einstein au développement de la relativité générale, un des points culminants de notre voyage. Nous suivrons les principales réponses données par le passé. Ensuite, nous serons bien plus audacieux : nous nous demanderons en fin de compte si les courts instants de temps existent réellement. Cette question, qui nous emmènera loin, est essentielle pour la dernière partie de notre aventure.

Lorsque nous examinerons la théorie quantique, nous découvrirons que le mouvement est en réalité – dans une certaine mesure – une illusion, comme Parménide l'avait affirmé. Plus précisément, nous montrerons que nous observons le mouvement parce que notre existence humaine a un caractère limité. Nous trouverons que nous ressentons le mouvement uniquement parce que nous évoluons sur la Terre, avec une taille finie, avec un nombre d'atomes très grand mais limité, avec une température finie et modérée, parce que nous sommes électriquement neutres, très grands comparés à un trou noir de même masse, énormes par rapport à notre longueur d'onde de la mécanique quantique, très petits comparés à l'univers, avec une mémoire limitée, contraints par notre cerveau d'estimer l'espace et le temps comme des choses continues, et contraints par notre cerveau de décrire la nature comme étant constituée de parties distinctes. Si une seule de ces conditions n'était pas vérifiée, nous n'observerions pas le mouvement. Le mouvement, alors, n'existerait pas. Chacune de ces conclusions peut être découverte plus efficacement si nous commençons avec la question suivante :

COMMENT DEVRIONS-NOUS PARLER DU MOUVEMENT ?

> « Je hais le mouvement, qui déplace les lignes,
> Et jamais je ne pleure et jamais je ne ris. »
> Charles Baudelaire, *La Beauté**

Réf. 7 * Charles Baudelaire (n. Paris 1821, d. Paris 1867).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

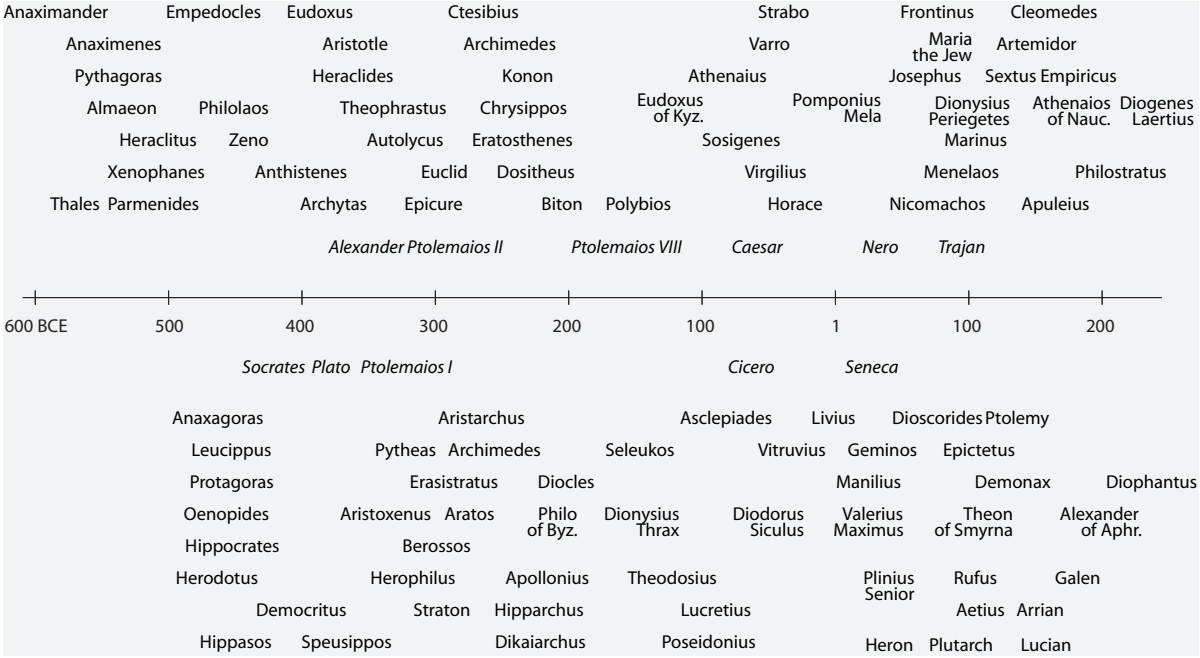


FIGURE 5 Une chronologie des scientifiques et des personnalités *politiques* dans l'Antiquité (la dernière lettre du nom est alignée avec l'année du décès).

Comme toute science, l'approche de la physique est double : nous progressons grâce à la *précision* et grâce à la *curiosité*. La précision donne aux échanges d'informations tout leur sens, et la curiosité fait qu'ils en valent la peine*. Toutes les fois que nous parlons du mouvement et que nous souhaitons avoir une meilleure précision ou une connaissance plus détaillée, nous sommes engagés, sciemment ou non, dans l'ascension de la Montagne Mouvement. À chaque augmentation dans la précision de la description, nous gagnons de l'altitude. Les exemples de la Figure 4 le pointent du doigt. Lorsque vous remplissez un seau avec une petite quantité d'eau, il n'est pas suspendu verticalement. (Pourquoi ?) Si vous continuez à ajouter de l'eau, il commence à se tenir verticalement à
Défi 4 pe partir d'un certain moment. Combien faut-il d'eau ? Lorsque vous tirez sur le fil d'une bobine de la manière indiquée, la bobine se déplacera en avant ou en arrière, en fonction de l'angle selon lequel vous tirez. Quel est l'angle limite entre les deux possibilités ?

Une grande précision implique d'explorer jusqu'aux détails les plus fins. Cette méthode *augmente* en fait le plaisir pour l'aventure**. Plus nous gagnons de l'altitude sur la Montagne Mouvement, plus nous voyons loin et plus notre curiosité est récompensée. Les vues offertes sont à couper le souffle, surtout depuis le point culminant. Le chemin que nous suivrons – un parmi tous les itinéraires possibles – commence du côté de la
Réf. 9 biologie et entre directement dans la forêt qui se trouve au pied de la montagne.

* Pour une série d'exemples intéressants sur le mouvement dans la vie de tous les jours, voir l'excellent livre
Réf. 8 de Walker.

Défi 5 s ** Méfiez-vous de quiconque voudrait vous parler *sans* examiner les détails. Il essaie de vous tromper. Les détails sont importants. Ainsi, soyez vigilants durant *cette* promenade.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 1 Contenus de livres relatifs au mouvement sélectionnés dans une bibliothèque publique.

THÈMES SUR LE MOUVEMENT	THÈMES SUR LE MOUVEMENT
photographies du mouvement	le mouvement comme thérapie pour le traitement du cancer, du diabète, de l'acné et de la dépression
perception du mouvement Réf. 21	cinétose (mal des transports)
le mouvement comme aide à la méditation	exercices physiques pour la forme et le bien-être
maîtrise du mouvement en sport	aptitude à bouger à l'examen de santé
mouvement perpétuel	chorégraphie dans la danse, la musique et autres arts
le mouvement des étoiles et des anges Réf. 11	le mouvement comme preuve de l'existence de divers créateurs Réf. 10
efficacité bénéfique du mouvement	lien entre les habitudes changeantes et émotionnelles
le mouvement en psychothérapie Réf. 12	le mouvement pour surmonter un traumatisme
troubles du mouvement	locomotion des insectes, chevaux et robots
les agitations au Parlement	les changements dans l'art, les sciences et la politique
les mécanismes dans les montres	les gesticulations à la Bourse
développement de la marche chez les enfants	apprentissage et enseignement du mouvement
mouvements musicaux	mouvements de troupes Réf. 13
mouvements religieux	mouvements intestinaux
déplacements aux échecs	tours de passe-passe au casino Réf. 14
rapport entre le produit national brut et la mobilité des citoyens	

Une vive curiosité nous conduit en ligne droite aux extrêmes : comprendre le mouvement nécessite d'explorer les distances les plus grandes, les vitesses les plus élevées, les particules les plus petites, les forces les plus fortes et les idées les plus étranges. Commençons.

QUELS SONT LES DIFFÉRENTS TYPES DE MOUVEMENTS ?

> « Chaque mouvement naît d'une volonté de changement. »
>
> Antiquité

Le lieu le plus approprié pour avoir une vue d'ensemble générale sur les types de mouvement est une grande bibliothèque, comme indiqué dans le Tableau 1. Les domaines dans lesquels le mouvement, les agitations et les déplacements jouent un rôle sont en réalité variés. Dans la Grèce ancienne les gens soupçonnaient déjà que tous les types de mouvement, et aussi plusieurs autres types de changement, étaient relatifs. Il est commun de distinguer au moins trois catégories.

La première catégorie de changement est celle du *déplacement* matériel, tels un individu en marche ou une feuille tombant d'un arbre. Le déplacement est le changement de position ou d'orientation des objets. Au sens large, l'activité humaine se place également

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 6 Un exemple de déplacement.

dans cette catégorie.

Une deuxième catégorie de changement regroupe les observations telles que la dissolution du sel dans l'eau, la formation de glace par congélation, la décomposition du bois, la cuisson des aliments, la coagulation du sang et la fusion et l'alliage des métaux. Ces changements de couleur, luminosité, dureté, température et autres propriétés matérielles sont appelés *transformations*. Les transformations sont des changements apparemment non reliés aux déplacements. Dans cette catégorie, quelques penseurs anciens y ajoutèrent l'émission et l'absorption de la lumière. Durant le vingtième siècle, on a prouvé que ces deux effets étaient des cas particuliers de transformations, comme le sont l'apparition et la disparition de matière récemment découvertes, que l'on observe dans le Soleil et dans la radioactivité. Le *changement d'esprit*, comme le changement d'humeur, de santé, d'éducation et de caractère, est également (principalement) un type de transformation.

Réf. 15

Réf. 16

La troisième catégorie particulièrement importante de changement est la *croissance*. Elle est observée chez les animaux, les plantes et les bactéries, mais aussi dans les cristaux, les montagnes, les étoiles et les galaxies. Au cours du dix-neuvième siècle, les changements dans les populations de systèmes, l'*évolution biologique*, et, au cours du vingtième siècle, les changements dans la taille de l'univers, l'*évolution cosmique*, ont été ajoutés à cette catégorie. Traditionnellement, ces phénomènes furent étudiés par des sciences distinctes, qui aboutirent toutes indépendamment à la conclusion que la croissance est une combinaison du déplacement et de la transformation. La différence est pour l'une la complexité et pour l'autre l'échelle de temps.

Pendant la Renaissance, au début de la science moderne, seule l'étude du déplacement a été perçue comme faisant partie du champ de la physique. Le mouvement était assimilé au déplacement. Les deux autres domaines furent ignorés des physiciens. Malgré cette restriction, le champ de la recherche restait large, recouvrant une grande partie de l'Île de l'Expérience. La tentation évidente est de structurer ce domaine en distinguant les diffé-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 7 Déplacement, croissance et transformation. (© Philip Plisson)

rents types de déplacement en fonction de leur origine. Les mouvements, tels que ceux des jambes lorsque nous marchons, sont *volontaires* parce qu'ils sont commandés par notre volonté, tandis que les déplacements d'objets externes, telle la chute d'un flocon de neige, que nous ne pouvons influencer par notre volonté, sont qualifiés de *passifs*. Les enfants sont capables de faire cette distinction à partir de 6 ans environ, et ceci marque une étape importante pour chaque personne dans le développement de sa compréhension précise de l'environnement*. À partir de cette distinction, la définition historique mais aujourd'hui périmée de la physique persiste comme une science du mouvement des objets inertes.

Puis, un jour, les machines sont apparues. À partir de ce moment-là, la distinction entre mouvements volontaire et passif s'est invitée dans le débat. Comme les êtres vivants, les machines peuvent se déplacer toutes seules et de cette façon imitent le mouvement volontaire. Toutefois, une observation méticuleuse nous montre que chaque élément dans une machine est déplacé par un autre, de telle sorte que leur mouvement est en fait passif. Les êtres vivants sont-ils également des machines ? Les activités humaines sont-elles aussi des exemples de mouvements passifs ? L'accumulation des observations durant les cent dernières années a rendu évident le fait que le déplacement volontaire** a, en réalité, les

* La réalisation complète de cet apprentissage peut échouer chez des individus ayant diverses convictions étranges, comme la croyance sur la capacité à agir sur la bille du jeu de la roulette, tel que découvert chez des joueurs compulsifs, ou sur la capacité à déplacer des objets distants par la pensée, tel que découvert chez de nombreuses autres personnes apparemment en bonne santé. Un récit divertissant et instructif sur toutes les duperies et illusions impliquées par l'apparition et la préservation de ces croyances est donné par James Randi, *The Faith Healers*, Prometheus Books, 1989. Prestidigitateur professionnel, il présente de nombreux sujets similaires dans plusieurs de ses autres ouvrages. Voir également le site Web http://www.randi.org pour plus de détails.

** En anglais, mouvement se dit *motion* [N.D.T.]. Le terme anglais « movement » est plutôt récent : il fut importé dans la langue anglaise à partir de l'ancien français et devint populaire seulement à la fin du dix-huitième siècle. Il ne fut jamais utilisé par Shakespeare.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mêmes propriétés physiques que le mouvement passif des systèmes inertes. (Bien sûr, sur le plan émotionnel, les différences restent importantes, par exemple, le *pardon* ne peut
Réf. 17 être attribué qu'au mouvement volontaire.) La distinction entre les deux types n'est donc pas nécessaire et sera omise par la suite. Puisque les mouvements passif et volontaire ont les mêmes propriétés, nous pouvons apprendre des choses sur l'homme lui-même à travers l'étude du mouvement des objets inertes. Cela sera plus flagrant lorsque nous évoquerons les thèmes du déterminisme, de la causalité, de la probabilité, de l'infini, du temps et du sexe, pour ne citer que quelques-uns des sujets que nous rencontrerons sur notre chemin.

Avec l'accumulation des observations durant les dix-neuvième et vingtième siècles, les barrières historiques sur l'étude du mouvement furent encore plus mises en exergue. Des observations étendues montrèrent que toutes les transformations et tous les phénomènes de croissance, y compris le changement et l'évolution du comportement, sont aussi des exemples de déplacement. En d'autres termes, plus de 2 000 ans d'études ont prouvé que l'ancienne classification des observations était inutile : tout changement est un déplacement. Au milieu du vingtième siècle, cela culmina même avec la confirmation d'une idée encore plus précise, déjà formulée dans la Grèce ancienne : *chaque type de changement est causé par le mouvement de particules*. Il a fallu beaucoup de temps et d'efforts pour arriver à cette conclusion, qui s'est présentée uniquement parce que nous avons avancé sans relâche vers la plus haute précision possible dans la description de la nature. Les deux premières parties de cette aventure retracent le chemin jusqu'à ce
Défi 6 s résultat. (Êtes-vous d'accord pour cela ?)

La dernière décennie du vingtième siècle a bouleversé cette vision. L'idée de particule s'est révélée fausse. Ce nouveau résultat, déjà suggéré par la théorie quantique avancée, apparaît dans la troisième partie de notre aventure à travers une combinaison d'observations et de déductions attentives. Mais nous aurons encore beaucoup de chemin à faire avant d'y arriver.

Pour l'instant, au début de notre promenade, nous retiendrons simplement que l'histoire a montré que la classification des différents types de mouvement n'est pas utile. C'est en essayant d'atteindre la précision maximale que l'on peut espérer arriver aux propriétés fondamentales du mouvement. La précision, et non la classification, est la règle à suivre. Comme Ernest Rutherford le disait : « All science is either physics or stamp collecting. »*

Pour atteindre la précision nécessaire dans notre description du mouvement, nous avons besoin de choisir des exemples particuliers de mouvement et de les étudier pleinement en détail. Il est intuitivement clair que la description la plus précise est réalisable pour les exemples *les plus simples* possibles. Dans la vie de tous les jours, c'est le cas du mouvement de tous les corps inertes, solides et rigides, dans notre environnement, telle une pierre lancée en l'air. En réalité, comme tous les hommes, nous avons appris
Réf. 18 à lancer des objets bien avant d'avoir appris à marcher. Le lancer est une des premières expériences physiques que nous ayons accomplies par nous-mêmes**. Durant notre plus tendre enfance, en lançant des pierres, des jouets et d'autres objets, nous explorions la

* « Toute science est soit de la physique soit une collection de timbres. » [N.D.T.]

** L'importance du lancer apparaît également à partir des termes qui en dérivent : en latin, des mots comme *subjicio* (*subicio*), sujet, mettre sous ou « jeter dessous », *adversus*, objet, protester ou « jeter en face », *interjicio* (*interjacio*), interjection, insérer ou « jeter entre ». En grec, il a mené à des termes comme *symbole* ou « jeter

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

perception et les propriétés du mouvement, jusqu'à ce que nos parents aient eu peur pour les appareils ménagers. Nous allons faire la même chose.

> « Die Welt ist unabhängig von meinem Willen*. »
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.373

Perception, continuité et changement

> « Il n'y a que les mauviettes qui n'étudient que le cas général, les vrais scientifiques courent après les exemples. »
> Beresford Parlett

Les êtres humains adorent percevoir les choses. La perception commence avant la naissance, et nous continuons à y prendre plaisir aussi longtemps que nous le pouvons. C'est pourquoi la télévision est si populaire, même quand elle est dépourvue de contenu. Pendant notre promenade à travers la forêt, au pied de la Montagne Mouvement, nous ne pouvons pas nous empêcher de percevoir. La perception est en premier lieu la capacité à *distinguer*. Nous utilisons l'opération cognitive élémentaire de la distinction à chaque instant de notre vie. Par exemple, durant notre enfance, nous avons tout d'abord appris à faire la distinction entre les objets familiers et inconnus, une aptitude rendue possible par l'association avec une autre capacité élémentaire, celle de *mémoriser* les expériences. La mémoire nous donne la possibilité d'expérimenter, de parler de la nature et donc de l'explorer. La perception, la classification et la mémorisation forment ensemble l'*apprentissage*. Dépourvus de l'une de ces trois aptitudes, nous ne pourrions pas étudier le mouvement.

Les enfants apprennent rapidement à distinguer la *continuité* de l'*instabilité*. Ils s'habituent à *reconnaître* les visages humains, même si un visage n'est jamais totalement le même à chaque fois qu'il est perçu. À partir de l'identification des visages, les enfants prolongent la reconnaissance à tout ce qui est observable. La reconnaissance fonctionne assez bien dans la vie quotidienne. Il est agréable de reconnaître ses amis, même dans la nuit, et même après plusieurs bières (ceci n'est pas un défi). L'action de reconnaître utilise donc toujours une forme de *généralisation*. Lorsque nous observons, nous avons toujours une idée générale dans notre esprit. Nous allons en préciser les principales.

Toutes les forêts nous rappellent l'essence de la perception. Assis sur l'herbe dans une clairière de la forêt au pied de la Montagne Mouvement, entourés par les arbres et le silence caractéristique de ces endroits, une sensation de tranquillité et de sérénité nous envahit. Soudain, quelque chose s'agite dans les buissons. Nos yeux se détournent sur-le-champ et notre attention se concentre. Les cellules nerveuses qui ont détecté le mouvement font partie de la région la plus ancienne de notre cerveau, que nous partageons avec les oiseaux et les reptiles : le tronc cérébral. À partir de ce moment, le cortex, ou cerveau récent, prend le relais pour analyser le type de mouvement et pour en déterminer l'origine. En surveillant le mouvement autour de notre champ de vision, nous observons deux entités invariantes : le paysage immobile et l'animal qui bouge. Après avoir identifié l'animal comme étant une biche, nous nous relâchons à nouveau.

Réf. 19

ensemble », *problème* ou « jeter en avant », *emblème* ou « jeter dedans » et – le petit dernier – *démon* ou « jeter à travers ».

* Le monde est indépendant de ma volonté.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Comment avons-nous fait la différence entre le paysage et la biche ? Plusieurs étapes dans la vision et dans le cerveau sont impliquées. Le mouvement joue un rôle important dans celles-ci, comme nous le voyons mieux à partir du petit film saccadé placé dans
Réf. 20 les coins inférieurs gauches de ces pages. Chaque image montre seulement un rectangle comblé par un motif mathématiquement aléatoire. Mais, lorsque nous faisons défiler ces pages, nous discernons une forme en mouvement sur un fond immobile. À un instant donné, la forme ne peut être dissociée du fond : aucun objet n'est visible sur chacune de ces images. Néanmoins il est facile de percevoir son mouvement*. Des expériences de perception comme celle-ci ont été effectuées avec de nombreuses variantes. Dans l'une d'elle, on a constaté que le fait de détecter un tel objet en mouvement n'est pas quelque chose de spécifique aux humains. Les mouches ont la même aptitude, comme, en fait, tous les animaux qui ont des yeux.

Le petit film saccadé sur le coin inférieur gauche, comme toutes les expériences similaires, fait apparaître deux relations primordiales. Premièrement, le mouvement est perçu uniquement si un *objet* peut être distingué d'un *arrière-plan* ou d'un *milieu ambiant*. Beaucoup d'illusions sur le mouvement se focalisent sur ce point**. Deuxièmement, le mouvement exige de définir à la fois l'objet et l'environnement, et de les différencier l'un de l'autre. En fait, la notion d'espace est – entre autres – une abstraction de l'idée d'arrière-plan. Ce fond est étendu, l'objet animé est localisé. Tout cela vous semble ennuyeux ? Ça ne l'est pas : attendez juste une seconde.

Appelons l'ensemble des propriétés localisées qui restent invariantes ou constantes pendant le mouvement, comme la taille, la forme, la couleur, etc., pris ensemble, *objet* (physique) ou *corps* (physique). Nous restreindrons ensuite la définition, puisque sinon les images pourraient aussi bien être des objets. En d'autres termes, exactement comme au début, nous ressentons le mouvement comme un processus *relatif*. Il est perçu en relation avec l'environnement et par opposition à lui. La notion d'objet est par conséquent aussi une notion relative. Mais la distinction théorique élémentaire entre les objets localisés, isolés et l'environnement étendu n'est pas insignifiante ou sans importance. Premièrement, cela donne l'impression d'une définition qui se mord la queue. (Êtes-vous
Défi 7 s d'accord ?) Plus tard, ce problème nous occupera énormément. Deuxièmement, nous utilisons tellement fréquemment notre capacité à isoler des systèmes localisés de leur environnement que nous l'acceptons sans l'ombre d'un doute. Toutefois, comme nous le verrons dans la troisième partie de notre promenade, cette distinction se révèle logique-
Page ?? ment et expérimentalement impossible*** ! Notre promenade nous amènera à découvrir la raison de cette impossibilité et ses conséquences importantes. Finalement, mis à part

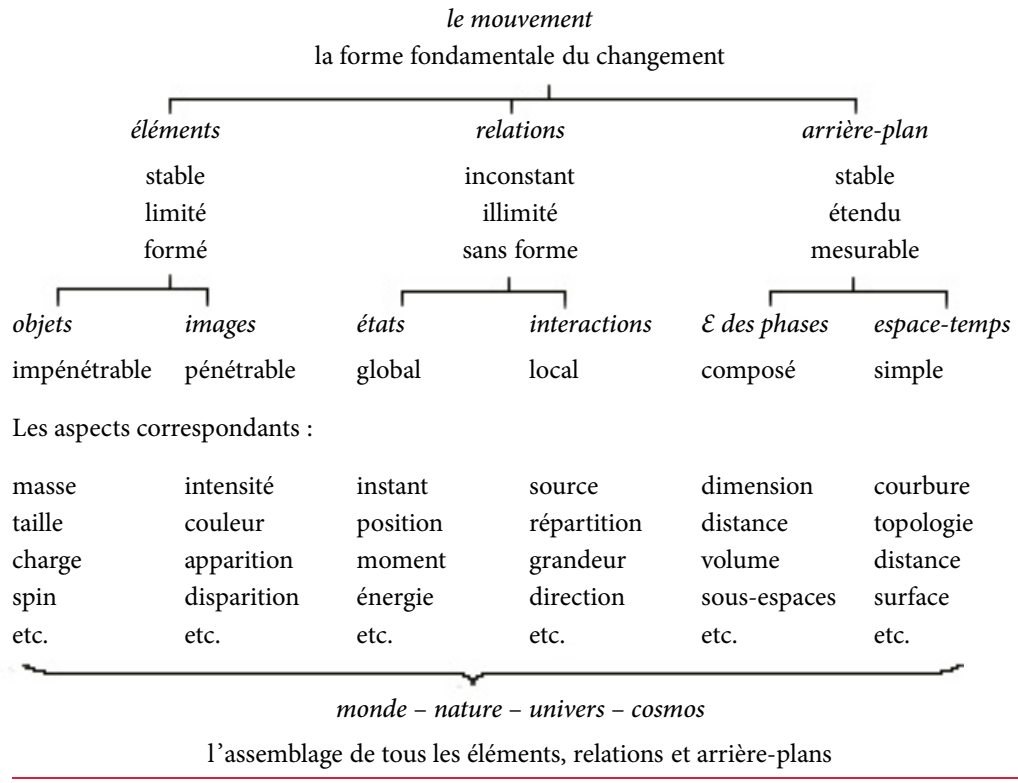
* L'œil humain est très performant pour détecter le mouvement. Par exemple, l'œil peut déceler le mouvement d'un point lumineux même si la variation de l'angle est plus petite que celle qui peut être distinguée sur une image fixe. Les détails de ce phénomène et d'autres thèmes analogues pour les autres sens font partie
Réf. 21 du domaine de la recherche sur la perception.

** Le thème de la perception du mouvement est plein d'aspects intéressants. Le chapitre 6 du magnifique ouvrage de DONALD D. HOFFMAN, *Visual Intelligence – How We Create What We See*, W.W. Norton & Co., 1998. en est une excellente introduction. Sa série d'illusions sur le mouvement élémentaire peut être expérimentée et approfondie en association avec le site Web http://aris.ss.uci.edu/cogsci/personnel/hoffman/hoffman.html.

*** Contrairement à ce que l'on peut fréquemment lire dans la littérature populaire, la distinction *est* possible dans la théorie quantique. Elle devient impossible seulement lorsque la théorie quantique est unifiée avec la relativité générale.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 2 Arbre généalogique des notions physiques fondamentales.



les entités mobiles et le fond immobile, nous avons besoin d'un troisième concept, tel qu'indiqué dans le Tableau 2.

> « Il n'y a qu'une chose sage, c'est de connaître la pensée qui peut tout gouverner partout. »
> Héraclite d'Éphèse

Réf. 22

LE MONDE A-T-IL BESOIN D'ÉTATS ?

> « Das Feste, das Bestehende und der Gegenstand sind Eins. Der Gegenstand ist das Feste, Bestehende ; die Konfiguration ist das Wechselnde, Unbeständige*. »
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 2.027 – 2.0271

Qu'est-ce qui différencie les divers dessins dans les coins en bas à gauche de chaque page ? Dans la vie quotidienne, nous dirions la *position* ou la *configuration* des objets concernés. La configuration décrit d'une certaine manière tous ces aspects qui peuvent être différents d'un cas à l'autre. On a coutume d'appeler la liste de tous les aspects

* Les objets, l'immuable et le perpétuel sont une seule et même chose. Les objets sont ce qui est immuable et durable ; leur configuration est ce qui est changeant et instable.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

variables d'un ensemble d'objets leur *état de mouvement (physique)*, ou plus simplement leur *état*.

Les configurations dans les coins en bas à gauche diffèrent de tous les autres d'abord par le *temps*. Le temps est ce qui rend les opposés possibles : un enfant est dans une maison et le même enfant est en dehors de la maison. Le temps rend compte de ce type de contradiction et le résout. Mais l'état ne distingue pas seulement des configurations différentes dans le temps : l'état contient *tous* les aspects d'un système (c'est-à-dire d'un groupe d'objets) qu'on ne retrouve pas dans les systèmes *stationnaires*. Deux objets peuvent avoir les mêmes masse, forme, couleur, composition et être indiscernables par rapport à toutes les autres propriétés intrinsèques, néanmoins ils seront différents par rapport à leur position, ou leur vitesse, ou leur orientation. L'état met le doigt sur l'*originalité* d'un système physique* et nous permet de le distinguer de ses copies conformes. Par conséquent, l'état décrit également la relation d'un objet ou d'un système avec son environnement. Ou pour résumer : *l'état décrit tous les aspects d'un système qui dépendent de l'observateur*. Ces propriétés ne sont pas inintéressantes – réfléDéfi 9 s chissez juste à ceci : l'univers possède-t-il un état ?

Décrire la nature comme un ensemble d'entités stables et d'états variables est le point de départ de l'étude du mouvement. Les divers aspects des objets et de leurs états sont appelés des *observables*. Toutes ces définitions approximatives et préliminaires seront affinées pas à pas par la suite. En utilisant les termes précédemment introduits, nous pouvons stipuler que *le mouvement est le changement d'état des objets***.

Les états sont nécessaires pour la description du mouvement. Afin de progresser et de réaliser une description *exhaustive* du mouvement, nous avons besoin d'une description complète des objets et d'une description complète de leurs états possibles. La première approche, appelée physique galiléenne, consiste à caractériser notre environnement *quotidien* le plus précisément possible.

Curiosités et défis amusants sur le mouvement

Le mouvement n'est pas toujours un sujet simple***.

* *

Défi 10 s Est-ce que le déplacement d'un fantôme est un exemple de mouvement ?

* *

* Un *système physique* est un objet d'étude localisé. Dans la classification du Tableau 2, le terme « système physique » est (à peu près) la même chose que « objet » ou « corps physique ». Les images ne sont habituellement pas considérées comme des systèmes physiques (bien que le rayonnement lumineux en soit un). Les Défi 8 s trous sont-ils des systèmes physiques ?

** La séparation exacte entre ces aspects propres à l'objet et ceux appartenant à l'état dépendent de la précision des observations. Par exemple, la longueur d'un morceau de bois n'est pas constante : le bois se rétrécit et se courbe avec le temps, en raison des processus en œuvre au niveau moléculaire. Pour être précis, la longueur d'un morceau de bois n'est pas une caractéristique de l'objet, mais de son état. Les observations méticuleuses *renversent* alors la distinction entre l'objet et son mouvement, la distinction elle-même ne disparaît pas – du moins pas pour le moment.

*** Les sections intitulées « curiosités » sont des séries de sujets et de problèmes qui permettent de vérifier et d'approfondir l'utilisation des notions récemment introduites.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

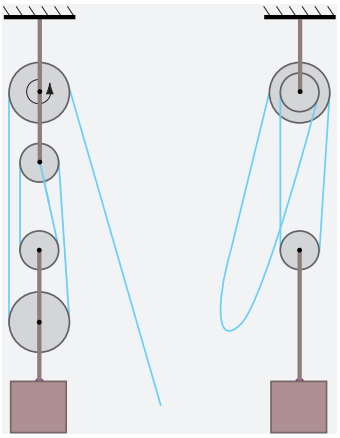


FIGURE 8 Une poulie composée et une poulie différentielle.

Un homme escalade une montagne de 9 heures du matin jusqu'à 13 heures. Il se couche au sommet et redescend le jour suivant, descendant encore une fois de 9 heures du matin jusqu'à 13 heures. Y a-t-il un endroit sur le chemin où il passe à la même heure les deux
Défi 11 s jours ?

* *

Défi 12 s Est-ce que quelque chose peut s'arrêter de bouger ? Comment pouvez-vous le montrer ?

* *

Est-ce qu'un corps se déplaçant pour toujours en ligne droite démontre que la nature est
Défi 13 s infinie ?

* *

Défi 14 s L'univers peut-il bouger ?

* *

Pour discuter de la précision avec précision, nous avons besoin de la mesurer. Comment
Défi 15 s vous y prendriez-vous ?

* *

Défi 16 s Pourrions-nous observer le mouvement si nous n'avions pas de mémoire ?

* *

Défi 17 s Quelle est la vitesse minimale que vous avez pu observer ? Y a-t-il une vitesse minimale dans la nature ?

* *

Selon la légende, le brahmane Sissa Ben Dahir, l'inventeur indien du jeu d'échecs, demanda au roi Sherham la récompense suivante pour son invention : il souhaita que l'on dépose un grain de blé sur la première case, deux sur la deuxième, quatre sur la troi-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sième, huit sur la quatrième, et ainsi de suite. Combien de temps tous les champs de blé
Défi 18 s du monde mettront-ils pour produire la quantité de grains nécessaire ?

* *

Lorsqu'une bougie allumée est déplacée, la flamme a du mal à suivre le mouvement de la bougie. Comment la flamme se comportera-t-elle si la bougie, toujours allumée, est
Défi 19 s placée dans une cage en verre et que l'ensemble est mis en mouvement ?

* *

Une bonne façon de gagner de l'argent est de construire des détecteurs de mouvement. Un détecteur de mouvement est une petite boîte dotée de quelques connecteurs métalliques. La boîte produit un signal électrique à chaque fois qu'elle bouge. Des détecteurs de quels types de mouvement pouvez-vous imaginer ? À quel prix pouvez-vous fabriquer
Défi 20 d une telle boîte ? Avec quelle précision ?

* *

Une boule parfaitement lisse et sphérique est posée près du bord d'une table parfaite-
Défi 21 d ment plate et horizontale. Que va-t-il se passer ? Au bout de combien de temps ?

* *

Vous marchez dans une boîte fermée dépourvue de fenêtre. La boîte est déplacée par des forces extérieures inconnues pour vous. Pouvez-vous déterminer, de l'intérieur de
Défi 22 s la boîte, comment vous vous déplacez ?

* *

Quelle longueur de corde devons-nous tirer pour soulever une masse d'une hauteur h à
Défi 23 s l'aide d'une poulie composée de quatre roues, comme indiqué sur la Figure 8 ?

* *

Lorsqu'un bloc est roulé sur un plancher sur un ensemble de tubes, quelles sont les vi-
Défi 24 s tesses du bloc et des tubes relativement au bloc ?

* *

Vous n'aimez pas les formules ? Si c'est le cas, utilisez la méthode suivante, qui ne prend
Réf. 15 que 3 minutes, pour inverser la situation. Cela vaut la peine de l'essayer, car elle va vous
Défi 25 s rendre la lecture de ce livre encore plus amusante. La vie est courte : elle devrait être, autant que possible, un plaisir, comme celui de lire cet ouvrage.

1 - Fermez les yeux et rappelez-vous une expérience qui fut *absolument merveilleuse*, une situation où vous vous êtes senti excité, curieux et optimiste.

2 - Ouvrez vos yeux pendant une seconde ou deux et regardez la page 68 – ou toute autre page qui contient de nombreuses formules.

3 - Fermez alors une nouvelle fois vos yeux et repensez à votre expérience merveilleuse.

4 - Répétez l'observation des formules et la visualisation de votre souvenir – étapes 2 et 3 – trois fois encore.

Sortez alors de votre souvenir, regardez autour de vous pour revenir à l'instant présent

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

et au lieu présent, puis testez-vous. Regardez une nouvelle fois la page 68. Comment trouvez-vous les formules maintenant ?

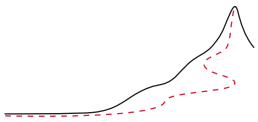
* *

Durant le seizième siècle, Niccolo Tartaglia* proposa l'énigme suivante. Trois jeunes couples veulent traverser une rivière. Seule une petite barque pouvant transporter deux personnes est disponible. Les hommes sont extrêmement jaloux et ne voudront jamais laisser leur fiancée seule avec un autre homme. Combien d'allers-retours sont-ils nécessaires pour traverser la rivière ?

Défi 26 s

* Niccolo Fontana Tartaglia (1499–1557), important mathématicien vénitien.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 2

DE LA MESURE DU MOUVEMENT À LA CONTINUITÉ

> « Physic ist wahrlich das eigentliche Studium des Menschen*.
>
> Georg Christoph Lichtenberg »

La description la plus simple du mouvement est celle que nous utilisons tous inconsciemment, comme les chats ou les singes, dans la vie de tous les jours : *une seule chose peut se trouver en un lieu donné à un instant donné*. Cette description générale peut être séparée en trois hypothèses : la matière est *impénétrable* et se *déplace*, le temps est fait d'*instants* et l'espace est fait de *points*. Sans ces trois hypothèses (êtes-vous d'accord pour les accepter ?) il est impossible de définir la vitesse dans la vie quotidienne. Cette description de la nature est appelée *physique galiléenne* ou *newtonienne*.

Défi 27 s

Galileo Galilei (1564–1642), professeur toscan de mathématiques, fut un fondateur de la physique moderne et est célèbre pour avoir défendu l'importance des observations comme moyens de vérification des hypothèses sur la nature. En exigeant et en accomplissant ces vérifications durant toute sa vie, il fut amené à améliorer constamment l'exactitude de la description du mouvement. Par exemple, Galilée étudia le mouvement en mesurant les variations de positions avec un chronomètre qu'il confectionna lui-même. Sa méthode remplaça la description spéculative de la Grèce ancienne par la physique expérimentale de la Renaissance italienne**.

Isaac Newton, alchimiste, mystique, théologien, physicien et politicien anglais (1643–1727), fut un des premiers à défendre avec vigueur l'idée selon laquelle les différents types de mouvement ont les mêmes propriétés. Il franchit des étapes importantes dans la mise en place des concepts utiles à la démonstration de cette idée***.

* « La Physique est vraiment l'étude appropriée de l'homme. » Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) fut un important physicien et essayiste.

** Le meilleur et le plus instructif des livres sur la vie de Galilée et sur son époque est celui de Pietro Redondi (voir la note de la page 229). Galilée naquit l'année où le crayon fut inventé. Avant sa naissance, il était impossible de faire des calculs avec un crayon et du papier. Pour les curieux, le site Web http://www.mpiwg-berlin.mpg.de vous permettra de lire un manuscrit original de Galilée.

*** Newton naquit un an après la mort de Galilée. Une autre activité de Newton, comme maître de la Monnaie royale, fut de surveiller personnellement la pendaison des faux-monnayeurs. Sur l'engouement de Newton pour l'alchimie, voyez le livre de Dobbs. Entre autres, Newton croyait lui-même avoir été choisi par Dieu : il prit son nom latin, Isaacus Neuutonus, et forma l'anagramme Jeova sanctus unus. Sur Newton et son rôle dans la mécanique classique, lisez l'ouvrage de Clifford Truesdell.

Réf. 23

Réf. 24

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 9 Galileo Galilei.

Qu'est-ce que la vitesse ?

« Il n'y a absolument rien d'autre de semblable. »
Jochen Rindt*

La vitesse fascine. Pour les physiciens, non seulement les rallyes automobiles sont intéressants, mais aussi tous les objets qui se déplacent. Par conséquent, ils ont d'abord évalué autant d'exemples que possible. Une sélection en est donnée dans le Tableau 4 et le Tableau 5. Les préfixes et les unités utilisés sont décrits en détail dans l'Annexe B.

La vie quotidienne nous apprend beaucoup de choses sur le mouvement : les objets peuvent se devancer les uns les autres et peuvent se déplacer dans des directions différentes. Nous remarquons également que les vitesses peuvent être augmentées ou modifiées de façon continue. La liste exhaustive de ces propriétés, fournie dans le Tableau 3, est résumée par les mathématiciens dans une expression particulière : ils disent que les vitesses forment un *espace vectoriel euclidien***. Nous donnerons plus de détails sur cette
Page 64 expression bizarre sous peu. Pour l'instant, notons simplement que, pour décrire la nature, les concepts mathématiques se présentent comme l'instrument le plus précis.

On qualifie la vitesse de *galiléenne* lorsqu'elle est présumée être un vecteur eucliden. La vitesse est un concept fondamental. Par exemple, la vitesse ne nécessite pas de mesures d'espace et de temps pour être définie. Êtes-vous capable de trouver une méthode pour
Défi 28 d mesurer les vitesses sans mesurer l'espace et le temps ? Si c'est le cas, vous avez vraisemblablement envie de sauter à la page 15, passant par-dessus 2 000 ans de recherches. Si vous ne trouvez pas, lisez bien ceci : toutes les fois que nous mesurons une quantité, nous supposons implicitement que n'importe qui est capable d'en faire autant et que tout le monde trouvera le même résultat. En d'autres termes, nous définissons la *mesure* par rapport à une valeur standard. Nous supposons alors implicitement qu'un tel standard existe, c'est-à-dire qu'un exemple de vitesse « parfaite » peut être découvert. Historique-

* Jochen Rindt (1942–1970), célèbre pilote autrichien de rallye automobile de Formule 1, parlant à propos de la vitesse.

** Ainsi nommé d'après Euclide, ou Eukleidês, le grand mathématicien grec qui vivait à Alexandrie aux alentours de l'an 300 av. J.-C. Euclide écrivit un traité monumental sur la géométrie, Στοιχεῖα ou les *Éléments*, qui est une des œuvres majeures de la pensée humaine. L'ouvrage expose toute la connaissance de l'époque sur la géométrie. Pour la première fois, Euclide introduisit deux approches qui sont maintenant utilisées communément : tous les énoncés sont déduits à partir d'un nombre réduit d'« axiomes » de base et, pour chaque énoncé, une « preuve » en est donnée. Le livre, encore édité aujourd'hui, fut l'œuvre de référence en géométrie pendant 2 000 ans. Sur le Web, on peut le trouver à l'adresse http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/java/elements/elements.html.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 3 Propriétés de la vitesse au sens quotidien – ou vitesse galiléenne.

Les vitesses peuvent	Propriété physique	Dénomination mathématique	Définition
Être distinguées	discernement	élément d'un ensemble	Page ??
Changer graduellement	continuité	espace vectoriel réel	Page 64,Page ??
Pointer quelque part	direction	espace vectoriel, dimensionalité	Page 64
Être comparées	mesurable	métrique	Page ??
Être cumulées	additivité	espace vectoriel	Page 64
Avoir des angles définis	direction	espace vectoriel euclidien	Page 64
Dépasser toute limite	infini	infinitude	Page ??

ment, l'étude du mouvement n'examina pas cette question au premier abord, parce que pendant plusieurs siècles personne ne put trouver un tel standard de vitesse. Vous êtes donc en bonne compagnie.

Réf. 28

Quelques chercheurs se sont spécialisés dans l'étude des vitesses les plus faibles que l'on rencontre dans la nature : ils sont appelés géologues. Ne manquez jamais l'occasion de traverser un site tout en écoutant parler l'un d'entre eux.

La vitesse est un sujet profond pour une deuxième raison : nous découvrirons que toutes les propriétés du Tableau 3 sont uniquement approchées, *aucune* n'est exacte en réalité. Des expériences perfectionnées nous dévoileront les limites de chaque propriété de la vitesse galiléenne. La faillite des trois dernières propriétés nous conduira à la relativité restreinte et générale, l'échec des deux du milieu à la théorie quantique et l'échec des deux premières propriétés à la description unifiée de la nature. Mais, pour l'instant, nous resterons accrochés à la vitesse galiléenne, et nous poursuivons avec un autre concept galiléen qui en dérive : le temps.

> « Sans les concepts de *lieu*, de *vide* et de *temps*, le changement ne peut se produire. [...] Il est donc clair [...] que leur compréhension doit être réalisée, en étudiant chacun d'entre eux séparément. »
>
> Aristote* *Physique*, Livre III, partie 1.

Qu'est-ce que le temps ?

> « Le temps n'existe pas intrinsèquement, mais seulement à travers les objets perçus, dont découlent les notions de passé, de présent et de futur. »
>
> Lucrèce**,*De rerum natura*, lib. 1, v. 460 ss.

Pendant les premières années de leur vie, les enfants passent beaucoup de temps à jeter des objets autour d'eux. Le terme « objet » est un mot latin qui signifie « la chose qui peut être jetée en face ». La psychologie évolutive a montré expérimentalement qu'à

* Aristote (384/3–322), savant et philosophe grec.
** Titus Lucretius Carus (v. 95 à v. 55 av. J.-C.), poète et érudit latin.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 4 Quelques valeurs mesurées de vitesse.

OBSERVATION	VITESSE
Croissance des stalagmites	0,3 pm/s
Pouvez-vous trouver quelque chose de plus lent ?	Défi 29 s
Croissance d'un nodule de manganèse en plaine abyssale	80 am/s
Croissance du lichen	≥ 7 pm/s
Déplacement caractéristique des continents	10 mm/a = 0,3 nm/s
Croissance humaine pendant l'enfance, croissance capillaire	4 nm/s
Croissance des arbres	≤ 30 nm/s
Déplacement des électrons dans un fil métallique	1 µm/s
Déplacement d'un spermatozoïde	de 60 à 160 µm/s
Vitesse de la lumière au centre du Soleil	0,1 mm/s
Déplacement du ketchup	1 mm/s
Plus petite vitesse de la lumière mesurée dans la matière sur Terre	0,3 m/s Réf. 25
Chute des flocons de neige	de 0,5 m/s à 1,5 m/s
Vitesse du signal dans les cellules nerveuses humaines	0,5 m/s à 120 m/s Réf. 26
Vitesse du vent à 1 degré Beaufort (très légère brise)	moins de 1,5 m/s
Vitesse de la pluie qui tombe, en fonction du rayon de la goutte	de 2 m/s à 8 m/s
Poisson le plus rapide à la nage, le voilier (*Istiophorus platypterus*)	22 m/s
Record de vitesse en navigation maritime (par le véliplanchiste Finian Maynard)	25,1 m/s
Animal le plus rapide à la course, le guépard (*Acinonyx jubatus*)	30 m/s
Vitesse du vent à 12 degrés Beaufort (ouragan)	plus de 33 m/s
Vitesse de l'air dans la gorge lors de l'éternuement	42 m/s
Le lancer mesuré le plus rapide : la balle du jeu de cricket	45 m/s
Homme en chute libre	de 50 à 90 m/s
Oiseau le plus rapide en vol, au piqué, le faucon pèlerin (*Falco peregrinus*)	60 m/s
Service le plus rapide au badminton	70 m/s
Vitesse moyenne des molécules d'oxygène dans l'air à température ambiante	280 m/s
Vitesse du son dans l'air sec au niveau de la mer et à température ordinaire	330 m/s
Claquement de l'extrémité du fouet	750 m/s
Vitesse d'une balle de fusil	3 km/s
Vitesse de la propagation de la fissure dans la brisure du silicium	5 km/s

Réf. 18 partir de cette toute première expérience les enfants extraient les notions de temps et d'espace. Les physiciens adultes en font de même lorsqu'ils étudient le mouvement à l'université.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 5 Quelques valeurs mesurées de vitesse (suite).

Observation	Vitesse
La plus haute vitesse macroscopique accomplie par l'homme : le satellite *Voyager*	14 km/s
Vitesse moyenne (et de pointe) de l'extrémité de l'éclair	600 km/s (50 000 km/s)
Vitesse de la Terre à travers l'univers	370 km/s
La plus haute vitesse macroscopique mesurée dans notre galaxie	$0{,}97 \cdot 10^8$ m/s Réf. 27
Vitesse des électrons dans un téléviseur couleur	$1 \cdot 10^8$ m/s
Vitesse des messages radio dans l'espace	299 792 458 m/s
La plus haute vitesse de groupe de la lumière jamais mesurée	$10 \cdot 10^8$ m/s
Vitesse d'un point lumineux émis par une tour de lumière lorsqu'il franchit la Lune	$2 \cdot 10^9$ m/s
La plus haute vitesse propre pour des électrons jamais réalisée par l'homme	$7 \cdot 10^{13}$ m/s
La plus haute vitesse possible pour un point lumineux ou une ombre	infinie

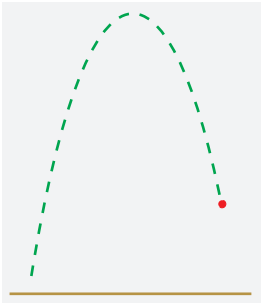


FIGURE 10 Une trajectoire typique suivie par une pierre jetée en l'air.

Lorsque nous jetons une pierre en l'air, nous pouvons définir une *succession* d'observations. Notre mémoire et nos sens nous donnent cette aptitude. L'ouïe enregistre les divers sons durant la montée, la chute et l'arrivée de la pierre. Nos yeux traquent l'emplacement de la pierre d'un point à l'autre. Toutes les observations ont leur emplacement dans la succession, avec certaines observations qui les précèdent, certaines observations qui leur sont simultanées, et d'autres encore qui les suivent. Nous disons que les observations sont perçues comme survenant à divers *instants* et nous appelons la succession des instants le *temps*.

Une observation qui est considérée comme étant la plus petite partie d'une succession, c'est-à-dire qui n'est pas elle-même une succession, est appelée un *événement*. Les événements sont primordiaux pour la définition du temps. En particulier, déclencher ou arrêter un chronomètre sont des événements. (Mais les événements existent-ils réellement ? Gardez cette question dans un coin de votre tête pendant que nous progressons.)

Défi 30 s

Les phénomènes successifs ont une autre propriété, connue comme étant la période, l'étendue ou la durée. Quelques valeurs mesurées sont données dans le Tableau 6*. La

* Une année est abrégée par a (« annus » en latin).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 6 Quelques mesures sélectionnées de temps.

OBSERVATION	TEMPS
Le plus petit temps mesurable	10^{-44} s
Le plus petit temps jamais mesuré	10^{-23} s
Temps mis par la lumière pour traverser un atome typique	$10^{-18\pm1}$ s
Période de la transition hyperfine de l'état fondamental du césium	108,782 775 707 78 ps
Battement d'aile de la mouche du vinaigre (drosophile)	1 ms
Période du pulsar (étoile à neutrons en rotation) PSR 1913+16	0,059 029 995 271(2) s
« Instant » humain	20 ms
La plus petite durée de vie d'un être vivant	0,3 j
Durée moyenne du jour il y a 400 millions d'années	79 200 s
Durée moyenne du jour aujourd'hui	86 400,002(1) s
Durée écoulée depuis votre naissance jusqu'à votre 1 000 millionième seconde de vie	31,7 a
Âge du plus ancien arbre vivant	4 600 a
Apparition du langage humain	$2 \cdot 10^5$ a
Âge de l'Himalaya	de 35 à 55 $\cdot 10^6$ a
Âge de la Terre	$4{,}6 \cdot 10^9$ a
Âge des plus vieux astres	13,7 Ga
Âge de la plupart des protons de votre corps	13,7 Ga
Durée de vie du noyau de tantale ^{180}Ta	10^{15} a
Durée de vie du noyau de bismuth ^{209}Bi	$1{,}9(2) \cdot 10^{19}$ a

durée reflète l'idée que les successions *prennent* du temps. Nous disons qu'une opération prend du temps pour exprimer l'idée que d'autres opérations peuvent avoir lieu parallèlement à celle-ci.

Qu'est exactement le concept de temps, comportant des successions et des durées, inféré par les observations ? Beaucoup de gens ont examiné cette question : les astronomes, les physiciens, les horlogers, les psychologues et les philosophes. Ils ont tous trouvé que *le temps est déduit en comparant des mouvements*. Les enfants, dès leur plus jeune âge, développent la notion de « temps » à partir de la comparaison des mouvements dans leur voisinage. Les grandes personnes considèrent le mouvement du Soleil comme une référence et nomment le type de temps qui en résulte le *temps local*. À partir de la Lune ils ont construit un *calendrier lunaire*. En prenant une horloge particulière dans un village d'une île européenne, ils l'appellent le *temps universel coordonné* (TUC, en anglais Coordinated Universal Time, UTC), autrefois connu sous le nom de « temps moyen de Greenwich »*. Les astronomes utilisent le déplacement des astres et nomment ce résultat

Réf. 18

* Le temps TUC officiel est utilisé pour déterminer la phase du courant électrique, les flux de transmission des compagnies de téléphone et le signal du système GPS utilisé par de nombreux systèmes de navigation dans le monde, notamment dans les navires, avions et camions. Pour plus d'informations, voir le site Web http://www.gpsworld.com. L'infrastructure de la gestion du temps est également importante pour d'autres pans de l'économie moderne. Pouvez-vous en repérer les plus importants ?

Défi 31 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

le *temps des éphémérides* (ou un de ses succédanés). Un observateur qui se réfère à sa montre personnelle désigne la lecture de celle-ci comme étant son *temps propre*, il est couramment utilisé dans la théorie de la relativité.

Tout mouvement n'est pas forcément une bonne référence de temps. En l'an 2000 une rotation de la Terre ne prenait pas 86 400 secondes, comme en l'an 1900, mais 86 400,002 secondes. Pouvez-vous deviner en quelle année votre anniversaire sera décalé d'une journée entière par rapport au temps prévu de 86 400 secondes ?

Page 309

Défi 32 s

Toutes les méthodes de définition du temps sont donc fondées sur des comparaisons entre mouvements. Dans le but de rendre ce concept aussi précis et aussi utile que possible, un *standard* de mouvement de référence est choisi, et avec celui-ci sont établies une succession standard et une durée standard. L'appareil qui réalise cette tâche est appelé une *horloge*. Nous pouvons alors répondre à la question du titre de cette section : *le temps est ce que nous lisons sur une horloge*. Remarquez que toutes les définitions du temps utilisées dans les diverses branches de la physique sont équivalentes à celle-ci. Aucune définition « plus profonde » ou plus fondamentale n'est possible*. Notez que le mot « moment » est en fait dérivé du mot « mouvement ». Dans ce cas précis, le langage suit la physique. De façon étonnante, la définition du temps qui vient d'être donnée est définitive. Elle ne changera plus jamais, même au sommet de la Montagne Mouvement. Cela peut surprendre au premier abord, car beaucoup de livres ont été écrits sur la nature du temps. Ils devraient plutôt examiner la nature du mouvement ! Mais c'est de toute façon le but de notre promenade. Nous sommes donc résignés à découvrir tous les secrets du temps comme une conséquence annexe de notre aventure. Chaque horloge nous rappelle qu'afin de comprendre le temps nous devons d'abord comprendre le mouvement.

Une *horloge* est un système en mouvement dont la position peut être lue. Bien sûr, une horloge *précise* est un système qui bouge le plus régulièrement possible, avec la plus petite perturbation extérieure possible. Y a-t-il une horloge parfaite dans la nature ? Les horloges existent-elles réellement en fin de compte ? Nous continuerons d'examiner ces questions dans tout ce travail et nous parviendrons pour finir à une conclusion étonnante. Pour l'instant, toutefois, nous énonçons un résultat intermédiaire ordinaire : puisque les horloges doivent exister, il existe d'une manière ou d'une autre dans la nature un procédé fondamental, naturel et *idéal* pour mesurer le temps. Pouvez-vous le découvrir ?

Défi 33 s

Le temps n'est pas seulement un aspect des observations, il est également une facette de notre expérience personnelle. Même dans notre vie intime la plus secrète, dans nos pensées, nos émotions et nos rêves, nous éprouvons les notions de succession et de durée. Les enfants apprennent à associer cette expérience intérieure du temps aux observations extérieures, et à faire usage de la propriété de diachronie des événements dans leurs activités. Les études sur l'origine du temps psychologique montrent qu'il coïncide – excepté par son manque d'exactitude – avec le temps des horloges**. Chaque personne vivante se sert inévitablement de la notion de temps dans sa vie de tous les jours comme d'une

* Les plus anciennes horloges sont les gnomons (ancêtres des cadrans solaires [N.D.T.]). La technique de leur construction s'appelle la *gnomonique*. Une introduction exhaustive et excellente dans ce domaine quelque peu insolite peut être consultée sur le site Web http://www.sundials.co.uk.

Page ??

** Le cerveau contient une multitude d'horloges. L'horloge la plus précise pour les intervalles de temps courts, le compteur d'intervalle interne, est plus fiable que ce que l'on pense souvent, surtout avec de l'entraînement. Pour les périodes de temps comprises entre quelques dixièmes de seconde, nécessaires en musique, et quelques minutes, les hommes peuvent atteindre une exactitude de quelques pour cent.

Réf. 29

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 7 Propriétés du temps galiléen.

LES INSTANTS DU TEMPS	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Peuvent être distingués	distinction	élément d'un ensemble	Page ??
Peuvent être ordonnés	succession	ordre	Page ??
Définissent la durée	mesurable	métrique	Page ??
Peuvent avoir une durée infinitésimale	continuité	compacité, complétude	Page ??
Autorisent l'addition des durées	additivité	métrique	Page ??
Ne cachent aucune singularité	invariance par translation	homogénéité	Page 164
N'ont pas de fin	infini	infinitude	Page ??
Sont équivalents pour tous les observateurs	absolu	unicité	

combinaison de succession et de durée. Cette réalité a été établie dans de multiples re-
Réf. 30 cherches. Par exemple, le terme « quand » existe dans toutes les langues.

Le temps est une notion *cruciale* pour dissocier différentes observations. Dans n'importe quelle séquence, nous constatons que les événements succèdent les uns aux autres continûment, apparemment sans fin. Dans ce contexte, « continûment » signifie que des observations qui ne sont pas trop éloignées dans le temps tendent à ne pas être trop différentes. Malgré tout, entre deux instants, aussi contigus qu'ils soient pour l'observateur, il y a toujours de la place pour d'autres événements. Les durées, ou *intervalles de temps*, consignées par des individus différents avec des horloges distinctes, concordent dans la vie quotidienne. Qui plus est, tous les observateurs s'accordent sur l'ordre des événements dans une séquence. Le temps est donc unique.

Les propriétés mentionnées du temps ordinaire, listés dans le Tableau 7, correspondent à l'interprétation fidèle de notre apprentissage quotidien du temps. Il est appelé *temps galiléen*. Toutes les propriétés peuvent être formulées collectivement en assignant au temps des nombres réels. En réalité, les nombres réels ont été forgés pour avoir préci-
Page ?? sément les mêmes propriétés que le temps galiléen, tel qu'il est expliqué dans l'entracte. Chaque instant du temps peut être désigné par un nombre réel, fréquemment noté t, et la durée d'une succession d'événements est donnée par l'écart entre les valeurs des événements final et initial.

Lorsque Galilée étudia le mouvement au cours du dix-septième siècle, les chronomètres n'existaient pas encore. En conséquence, il dut en construire un lui-même pour pouvoir mesurer des temps compris entre une fraction et quelques secondes. Pouvez-
Défi 34 s vous deviner comment il s'y est pris ?

Nous aurons justement beaucoup de divertissement avec le temps galiléen dans les deux premiers chapitres. Pourtant, des centaines d'années d'examen très minutieux ont montré que *chaque propriété* du temps que nous venons de lister est approximative, qu'aucune n'est strictement exacte. Cette histoire est relatée dans les chapitres qui suivent.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Pourquoi les horloges tournent-elles dans le sens des aiguilles d'une montre ?

Défi 35 s

> « Quelle heure est-il en ce moment au pôle Nord ? »

Tous les mouvements de rotation dans notre société, comme les courses d'athlétisme, de chevaux, de vélo ou les courses de patins à glace, tournent dans le sens inverse de celui des aiguilles d'une montre. De façon analogue, chaque supermarché guide ses clients dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à travers les allées. Les mathématiciens nomment cela le sens de rotation positif. Pourquoi ? La majorité des gens sont droitiers, et la main droite a plus de liberté lorsqu'elle est située vers l'extérieur du cercle. C'est également pour cela qu'il y a plusieurs centaines d'années les courses de chars dans les arènes se déroulaient dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ainsi, toutes les courses en font toujours de même aujourd'hui. C'est pour cela aussi que les coureurs se déplacent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Pour le même motif, les escaliers en colimaçon dans les châteaux sont édifiés de telle manière que les défenseurs droitiers, depuis les marches plus élevées, aient cette main vers l'extérieur.

À l'inverse, les horloges imitent l'ombre des cadrans solaires. Évidemment, cela est vrai seulement dans l'hémisphère Nord, et uniquement pour des cadrans solaires posés à même le sol, qui sont les plus répandus. (La vieille astuce pour localiser le sud en dirigeant l'aiguille des heures d'une montre horizontale vers le Soleil et en divisant par deux l'angle entre celle-ci et la direction de midi ne fonctionne pas dans l'hémisphère Sud.) Donc le fonctionnement de l'horloge indique tacitement dans quel hémisphère elle fut inventée. En plus, ceci nous indique également que les cadrans solaires fixés aux murs furent utilisés après ceux posés au sol.

Est-ce que le temps s'écoule ?

> « Wir können keinen Vorgang mit dem 'Ablauf der Zeit' vergleichen – diesen gibt es nicht –, sondern nur mit einem anderen Vorgang (etwa dem Gang des Chronometers)*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.3611

L'expression « l'écoulement du temps » est souvent utilisée pour exprimer le fait que dans la nature les changements se succèdent d'une manière régulière et continue. Mais bien que les aiguilles d'une horloge « glissent », le temps lui-même ne le fait pas. Le temps est une abstraction introduite spécialement pour décrire l'écoulement des événements autour de nous. Il ne s'écoule pas lui-même, il *définit* l'écoulement. Le temps n'avance pas. Le temps n'est ni linéaire ni cyclique. L'idée que le temps s'écoule constitue une entrave à la compréhension de la nature, comme l'idée que les miroirs intervertissent la droite et la gauche.

Page ??

L'usage fallacieux de l'expression « l'écoulement du temps », diffusée d'abord par quelques penseurs grecs puis par Newton, persiste. Aristote (384/3–322 av. J.-C.), attentif au raisonnement logique, pointa du doigt ce malentendu, et d'autres le firent éga-

Réf. 31

* Nous ne pouvons pas comparer un processus avec « le passage du temps » – il n'existe pas de telle chose – mais seulement avec un autre processus (tel que le fonctionnement d'un chronomètre).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lement après lui. Néanmoins, des expressions telles que « le renversement du temps », « l'irréversibilité du temps », et le trop usité « la flèche du temps » sont encore d'usage
Défi 36 e courant. Lisez simplement une revue scientifique populaire choisie au hasard. Le fait est le suivant : le temps ne peut pas être renversé, seul le mouvement peut l'être, ou plus précisément les vitesses des objets. Le temps n'a pas de flèche, seul le mouvement en a une. Ce n'est pas l'écoulement du temps que les hommes ne peuvent arrêter, mais le mouvement de tous les objets dans la nature. Incroyablement, il y a même des livres
Réf. 32 écrits par d'éminents physiciens qui étudient différents types de « flèches du temps » et les comparent les unes aux autres. Comme on peut le prévoir, aucun résultat tangible ou nouveau n'en est issu. Le temps ne s'écoule pas.

De la même façon, les expressions verbales comme « le début (ou la fin) du temps » devraient être bannies. Un spécialiste du mouvement les traduit immédiatement par « le début (ou la fin) du mouvement ».

Qu'est-ce que l'espace ?

> « L'introduction des nombres comme coordonnées [...] est un acte de violence [...]. »
> Hermann Weyl, *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft**.

À chaque fois que nous distinguons deux objets l'un de l'autre, par exemple deux étoiles, nous distinguons en tout premier lieu leur position. La distinction des positions est la capacité principale de notre sens visuel. La position est par conséquent une propriété importante de l'état physique d'un objet. Une position donnée est occupée par un seul objet à un instant donné. Les positions sont limitées. L'ensemble de toutes les positions disponibles, désigné par *espace (physique)*, agit à la fois comme un contenant et un arrière-plan.

La *taille* est une notion étroitement apparentée à l'espace et à la position, c'est l'ensemble des positions qu'un objet occupe. Des petits objets occupent uniquement des sous-ensembles de positions accaparées par ceux qui sont plus grands. Nous allons bientôt discuter de la taille.

Comment mettons-nous en évidence l'espace à partir des observations ? Pendant l'enfance, les hommes (et la plupart des animaux supérieurs) apprennent à rassembler les diverses perceptions de l'espace – visuelle, tactile, auditive, kinesthésique, vestibulaire, etc. – dans un ensemble cohérent d'expériences et de descriptions. L'aboutissement de ce processus d'apprentissage est une certaine « forme » de l'espace dans le cerveau. En fait, la question « où ? » peut être posée et on peut y répondre dans toutes les langues du monde. Pour être plus précis, les adultes tirent l'origine de l'espace des mesures de distance, grâce auxquelles les notions de longueur, de superficie, de volume, d'angle et d'angle solide sont toutes déduites. Les géomètres (mathématiciens et de terrain), les architectes, les astronomes, les vendeurs de moquette et les fabricants de doubles-décimètres fondent leur métier sur les mesures de distance. L'espace est un concept fa-

* Hermann Weyl (1885–1955) fut l'un des plus importants mathématiciens de son époque, aussi bien qu'un physicien théoricien éminent. Il fut un des derniers savants ayant embrassé les deux domaines, un contributeur de la théorie quantique et de la relativité, inventeur du terme théorie de « jauge », et auteur de nombreux ouvrages populaires.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

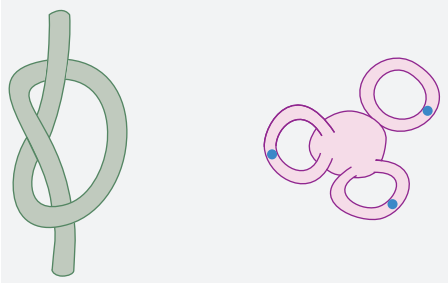


FIGURE 11 Deux preuves que l'espace possède trois dimensions : un nœud et l'oreille interne d'un mammifère.

çonné pour synthétiser toutes les relations de distance entre objets pour une description précise des observations.

Les doubles-décimètres fonctionnent bien uniquement s'ils sont droits. Mais, lorsque les hommes vivaient dans la forêt vierge, ils n'avaient pas d'objets droits autour d'eux. Aucune règle droite, aucun outil droit, rien. Aujourd'hui, la vue d'une ville est principalement une collection de lignes droites. Pouvez-vous expliquer comment les hommes ont pu accomplir cela ?

Défi 37 s

Une fois les hommes sortis de la jungle avec leur règle fraîchement construite, ils rassemblèrent une foison de résultats. Les principaux d'entre eux sont énoncés dans le Tableau 8. Ils sont facilement confirmés par l'expérience personnelle. Les objets peuvent prendre des positions d'une manière apparemment *continue* : il y a sûrement davantage de positions que ce qui peut être dénombré*. La notion de taille est comprise en définissant la distance entre diverses positions, appelée *longueur*, ou en utilisant le champ de vision qu'un objet occupe lorsqu'il est observé, appelé sa *surface*. Longueur et surface peuvent être mesurées à l'aide d'une règle plate. Quelques mesures effectuées sont données dans le Tableau 9. La longueur des objets est indépendante de la personne qui les mesure, de leur position et de leur orientation. Dans la vie quotidienne la somme des angles de n'importe quel triangle est égale à deux angles droits. Il n'y a aucune exception dans l'espace.

L'expérience nous montre que l'espace possède trois dimensions. Nous pouvons définir des séries de positions dans précisément trois directions différentes. En fait, l'oreille interne de (pratiquement) tous les vertébrés possède trois canaux semi-circulaires qui perçoivent la position du corps dans les trois dimensions de l'espace, comme indiqué sur la Figure 11**. De la même manière, chaque œil humain est commandé par trois paires de muscles. (Pourquoi trois ?) Une autre preuve que l'espace possède trois dimensions est alléguée par les lacets : si l'espace avait plus de trois dimensions, les lacets seraient inutiles, parce que les nœuds n'existent que dans un espace tridimensionnel. Mais pourquoi l'espace a-t-il trois dimensions ? Il s'agit probablement de la question la plus ardue de la physique. Elle ne trouvera une réponse que dans la toute dernière étape de notre excursion.

Défi 38 s

* Pour une définition de l'indénombrabilité, voir la page **??**.

** Remarquez que le fait de stipuler que l'espace a trois dimensions *implique* que l'espace est continu. Le mathématicien et philosophe néerlandais Luitzen Brouwer (n. Overschie 1881, d. Blaricum 1966) montra que la dimensionalité est un concept nécessaire uniquement pour les ensembles continus.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 8 Propriétés de l'espace galiléen.

LES POINTS	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Peuvent être distingués	distinction	élément d'un ensemble	Page ??
Peuvent être ordonnés s'ils sont alignés	succession	ordre	Page ??
Peuvent façonner des formes	forme	topologie	Page ??
Se disposent dans trois directions indépendantes	existence des nœuds	tri-dimensionalité	Page ??
Peuvent avoir une distance infinitésimale	continuité	compacité, complétude	Page ??
Définissent les distances	mesurable	métrique	Page ??
Permettent d'additionner des translations	additivité	métrique	Page ??
Définissent les angles	produit scalaire	espace euclidien	Page 64
Ne masquent aucune singularité	invariance par translation	homogénéité	
Peuvent dépasser toutes les frontières	infini	infinitude	Page ??
Sont définis pour tous les observateurs	absolu	unicité	Page 42

Il est souvent dit qu'il est impossible d'imaginer quatre dimensions. C'est faux. Essayez seulement. Par exemple, pouvez-vous approuver que les nœuds sont impossibles à faire en quatre dimensions ?

Défi 39 s

Comme les intervalles de temps, les intervalles d'espace peuvent êtres décrits avec plus de précision à l'aide des *nombres réels*. Afin de simplifier la communication, des *unités* de référence sont utilisées, de telle façon que tout le monde utilise les mêmes nombres pour des longueurs identiques. Les unités nous permettent d'explorer empiriquement les propriétés générales de l'*espace galiléen* : l'espace, le contenant des objets, est continu, tridimensionnel, isotrope, uniforme, infini, euclidien et unique ou « absolu ». En mathématiques, une structure ou concept mathématique qui possède toutes les propriétés mentionnées ci-dessus est appelé un *espace euclidien* tridimensionnel. Ses éléments, les *points (mathématiques)*, sont décrits par trois paramètres réels. Ils sont communément notés

$$(x, y, z) \tag{1}$$

et dénommés *coordonnées*. Ils désignent et quantifient l'emplacement d'un point dans l'espace. (Pour la définition exacte des espaces euclidiens, voir page 64.)

Ce qui vient d'être dit en seulement une demi-page a pris en réalité 2 000 ans pour être développé, principalement parce qu'il fallut d'abord découvrir les concepts de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 12 René Descartes.

« nombre réel » et de « coordonnée ». La première personne qui décrivit les points de l'espace de cette façon fut le célèbre mathématicien et philosophe René Descartes*. d'après qui les coordonnées de l'expression (1) furent appelées *cartésiennes*.

Comme le temps, l'espace est un concept *indispensable* pour décrire le monde. En réalité, l'espace est implicitement introduit lorsque nous décrivons des situations avec plusieurs objets. Par exemple, quand plusieurs boules sont posées sur une table de billard, nous ne pouvons échapper à l'emploi de l'espace pour détailler les relations entre elles. Il n'existe aucune manière d'éviter l'utilisation des concepts d'espace quand nous traitons de la nature.

Bien que nous ayons de toute manière besoin de l'espace pour parler de la nature, il est quand même intéressant de se demander pourquoi c'est comme ça. Par exemple, depuis que des méthodes de mesures de longueur existent, il doit y avoir une manière *naturelle* ou *idéale* pour mesurer des distances, des tailles et des rectitudes. Pouvez-vous la trouver ?

Défi 40 s

De même que pour le temps, chacune des propriétés de l'espace listées ci-dessus doit être vérifiée. Et à nouveau, des observations méticuleuses nous montreront que chaque propriété est approximative. En termes plus abrupts et plus concis, elles sont *toutes* erronées. Cela entérine la déclaration de Weyl au début de cette section. En fait, l'histoire de cette violence liée à l'introduction des nombres est contée par chaque forêt du monde, et bien entendu également par celle située au pied de la Montagne Mouvement. Pour l'écouter, nous devons simplement prêter l'oreille attentivement à ce que les arbres ont à nous dire.

> « Μέτρον ἄριστον**. »
>
> Cléobule

L'ESPACE ET LE TEMPS SONT-ILS ABSOLUS OU RELATIFS ?

Dans la vie de tous les jours, les notions d'espace et de temps galiléens renferment deux points de vue antagonistes. Cette dissonance a attisé les débats pendant plusieurs siècles. D'un côté, l'espace et le temps expriment quelque chose d'invariable et de permanent, ils agissent ensemble comme de grands récipients pour tous les objets et les

* René Descartes ou Cartesius (1596–1650), mathématicien et philosophe français, auteur de la célèbre expression « je pense, donc je suis », traduction de « cogito ergo sum ». De son point de vue c'est la seule formulation que nous pouvons tenir pour certaine.

** « La mesure est la meilleure des choses. » Cléobule (Κλεοβουλος) de Lindos, (v. 620–550 av. J.-C.) fut un des sept sages très connus.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 9 Quelques valeurs de mesures de distance.

OBSERVATION	DISTANCE
Longueur d'onde de Compton d'une galaxie	10^{-85} m (calculé seulement)
Longueur de Planck, la plus petite longueur mesurable	10^{-32} m
Diamètre du proton	1 fm
Longueur d'onde de Compton de l'électron	2,426 310 215(18) pm
Taille de l'atome d'hydrogène	30 pm
Plus petite oscillation du tympan détectable par l'oreille humaine	50 pm
Taille d'une petite bactérie	0,2 µm
Longueur d'onde de la lumière visible	de 0,4 à 0,8 µm
Le point : diamètre du plus petit objet visible à l'œil nu	20 µm
Diamètre du cheveu humain (du plus fin au plus épais)	de 30 à 80 µm
Longueur totale de l'ADN dans chaque cellule humaine	2 m
La plus grande créature vivante, le champignon *Armillaria ostoyae*	3 km
Longueur de l'équateur terrestre	40 075 014,8(6) m
Longueur totale des cellules nerveuses humaines	$8 \cdot 10^5$ km
Distance moyenne au Soleil	149 597 870 691(30) m
Une année-lumière	9,5 Pm
Distance à une étoile ordinaire	10 Em
Taille de la galaxie	1 Zm
Distance à la galaxie d'Andromède	28 Zm
L'objet visible le plus lointain	125 Ym

événements découverts dans la nature. En suivant cette voie, l'espace et le temps ont une réalité propre. En ce sens nous pouvons dire qu'ils sont fondamentaux ou *absolus*. D'un autre côté, l'espace et le temps sont des outils descriptifs qui nous permettent de parler des relations entre objets. Selon cette idée, ils n'ont plus aucun sens lorsqu'ils sont dissociés des objets et résultent uniquement des rapports entre ceux-ci. Ils sont dérivés, apparentés ou *relatifs*. Lequel de ces points de vue adopteriez-vous ? Les résultats de la physique ont alternativement privilégié une position puis l'autre. Nous renouvellerons cette hésitation tout au long de notre aventure, jusqu'à ce que nous trouvions la réponse. Et à l'évidence il s'agira d'une troisième solution.

Défi 41 e

Réf. 33

LA TAILLE – POURQUOI LES SURFACES EXISTENT-ELLES, MAIS PAS LES VOLUMES ?

La taille est un aspect primordial des objets. Comme un petit enfant qui n'a pas encore l'âge scolaire, chaque homme, dans ses agissements, découvre comment utiliser les propriétés de la taille et de l'espace. Comme des adultes qui cherchent la précision, la définition de la *distance* comme étant la différence entre des coordonnées nous permet de définir la *longueur* d'une manière fiable. Il a fallu plusieurs centaines d'années pour

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

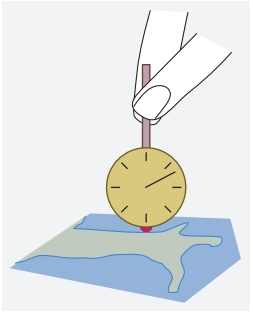


FIGURE 13 Un curvimètre ou odomètre.

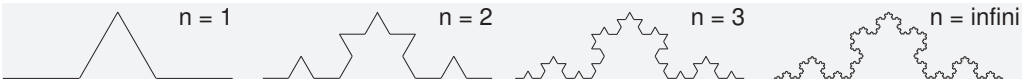


FIGURE 14 Une fractale : une courbe auto-similaire de longueur infinie (complètement à droite), et sa construction.

s'apercevoir que quelque chose ne *collait pas*. Plusieurs recherches en physique et en mathématiques aboutirent à des complications.

Les problèmes physiques se déclenchèrent avec une question étonnamment simple posée par Lewis Richardson* : quelle est la longueur de la côte ouest de l'Angleterre ?

En suivant la ligne du littoral sur une carte à l'aide d'un odomètre, un appareil représenté sur la Figure 13, Richardson trouva que la longueur l du littoral dépendait de l'échelle s (supposons 1 :10 000 ou 1 :500 000) de la carte utilisée :

$$l = l_0 \, s^{0,25} \tag{2}$$

(Richardson découvrit d'autres nombres pour d'autres côtes.) Le nombre l_0 est la longueur à l'échelle 1 :1. Le résultat principal est que plus la carte est grande, plus la côte est longue. Qu'arriverait-il si l'échelle de la carte était agrandie au-delà même de la taille de l'original ? La longueur croîtrait au-delà de toutes limites. Un littoral peut-il réellement avoir une longueur *infinie* ? Oui, il le peut. En fait, les mathématiciens ont décrit un grand nombre de ces courbes : ils les ont nommées des *fractales*. Il en existe un nombre infini, et la Figure 14 en montre un exemple**. Pouvez-vous en construire d'autres ?

Défi 42 e

La longueur possède d'autres caractéristiques étranges. Le mathématicien italien Giuseppe Vitali fut le premier à découvrir qu'il est possible de couper un segment de droite de longueur 1 en morceaux qui peuvent être ré-assemblés – simplement en les alignant dans la direction du segment – en un segment de droite de longueur 2. Êtes-vous capable

* Lewis Fray Richardson (1881–1953), psychologue et physicien anglais.

** La plupart de ces courbes sont *auto-similaires*, c'est-à-dire qu'elles suivent des « lois » d'échelle similaires à celle mentionnée ci-dessus. Le terme « fractale » est dû au mathématicien polonais Benoît Mandelbrot et se réfère à une propriété étrange : dans un certain sens, elles ont un nombre de dimensions D non entier, bien qu'elles soient unidimensionnelles par construction. Mandelbrot remarqua que la dimension non entière était liée à l'exposant e de Richardson par $D = 1 + e$, donnant ainsi $D = 1,25$ dans l'exemple ci-dessus. La longueur des côtes et d'autres fractales sont merveilleusement présentées dans Heinz-Otto Peitgen, Hartmut Jürgens & Dietmar Saupe, *Fractals for the Classroom*, Springer Verlag, 1992, pp. 232–245. Cet ouvrage est également disponible dans plusieurs autres langues.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de découvrir une telle division en vous servant de l'astuce que cela n'est réalisable qu'en
Défi 43 d utilisant un nombre infini de morceaux ?

Pour résumer, la longueur est bien définie pour des lignes qui sont droites ou incurvées de manière régulière, mais pas pour des lignes compliquées ou pour des lignes constituées d'une infinité de morceaux. Nous allons par conséquent éviter les fractales et autres courbes bizarrement formées par la suite, et nous allons prendre toutes nos précautions lorsque nous parlerons de segments infiniment petits. Cela fait partie des hypothèses principales des deux premières étapes de cette destinée, et nous ne devrons jamais les oublier. Nous reviendrons sur ces hypothèses dans la troisième partie.

En réalité, toutes ces complications s'estompent lorsqu'elles sont confrontées au problème subséquent. Ordinairement, les aires et les volumes sont définis en recourant à la longueur. Vous pensez que c'est enfantin ? Vous êtes dans l'erreur, de même que vous êtes une victime des préjugés répandus par les écoles à travers le monde. Pour caractériser l'aire et le volume avec précision, leurs définitions doivent inclure deux propriétés : les valeurs doivent être *additives*, c'est-à-dire que, pour des ensembles finis ou infinis d'objets, l'aire et le volume total doivent être la somme des aires et des volumes de chaque élément de l'ensemble, et ils doivent être *inflexibles*, c'est-à-dire que, si l'on coupe une surface ou un volume en morceaux et qu'ensuite on remet ces morceaux en place, la valeur résultante doit demeurer identique. De telles définitions existent-elles ? Dit autrement, ces concepts d'aire et de volume existent-ils ?

Pour des aires dans une surface plane, nous procédons de la manière classique suivante : nous définissons l'aire A d'un rectangle de côtés a et b comme $A = ab$. Puisque n'importe quel polygone peut être transformé en un rectangle avec un nombre fini de
Défi 44 s coupes droites, nous pouvons alors évaluer l'aire de tous les polygones. Ensuite, nous pouvons définir l'aire des figures régulièrement courbées comme étant la limite de la somme de celles d'une infinité de polygones. Cette méthode, nommée *intégration*, est
Page 174 présentée en détail dans la section sur l'action physique.

Toutefois, l'intégration ne nous permet pas de définir l'aire de domaines ayant des
Défi 45 s frontières arbitraires. (Pouvez-vous vous figurer un tel domaine ?) Pour une définition complète, des outils plus sophistiqués sont nécessaires. Ils furent découverts en 1923 par le célèbre mathématicien Stefan Banach*. Il démontra que nous pouvons malgré tout définir une aire pour tous les ensembles de points quels qu'ils soient, même si la limite n'est pas continûment courbée mais extrêmement complexe, telle la courbe fractale précédemment mentionnée. Aujourd'hui cette notion généralisée de l'aire, techniquement une « mesure dénombrablement additive et invariante par isométrie », est appelée une *mesure de Banach* en son honneur. Les mathématiciens résument cette explication en disant que, puisqu'il existe une mesure de Banach en deux dimensions, il y a une manière de définir le concept d'aire – une mesure additive et rigide – pour tous les ensembles de points quels qu'ils soient**.

* Stefan Banach (Cracovie 1892–Lvov 1945) fut un important mathématicien polonais.

** En fait, cela est vrai uniquement pour des ensembles d'une surface plane. Pour des surfaces courbées telles que la surface d'une sphère, existent des difficultés que ne seront pas exposées ici. En plus, les problèmes soulevés dans la définition de la longueur des fractales surgissent également pour l'aire si la surface à mesurer n'est pas plate mais pleine de collines et de vallées. Un exemple typique est la superficie du poumon humain : en fonction de l'échelle de précision de l'examen, nous trouvons une valeur qui varie de cent mètres carrés jusqu'à beaucoup plus.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

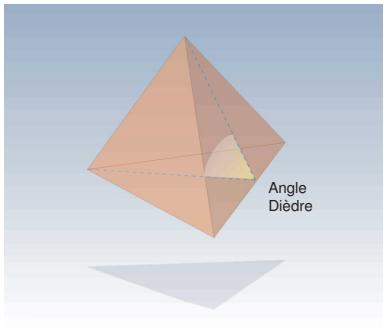


FIGURE 15 Un polyèdre avec un de ses angles dièdres. (© Luca Gastaldi)

Quelle est la situation en *trois* dimensions, c'est-à-dire pour le volume ? Nous pouvons commencer de la même façon que pour l'aire, en définissant le volume V d'un polyèdre rectangulaire de côtés a, b, c comme $V = abc$. Mais nous rencontrons alors le premier écueil : un polyèdre en général ne peut pas toujours être réduit à un cube par des coupes droites ! Cet achoppement fut découvert en 1900 et 1902 par Max Dehn*. Il remarqua que cette possibilité dépend des valeurs des angles des arêtes, ou angles dièdres, comme les mathématiciens les nomment. Si nous assignons à chaque arête d'un polyèdre en général un nombre donné par sa longueur l multipliée par une fonction particulière $g(\alpha)$ de son angle dièdre α, alors Dehn montra que la somme de tous les nombres pour toutes les arêtes d'un solide ne change pas après découpage, pourvu que la fonction satisfasse la relation $g(\alpha+\beta) = g(\alpha) + g(\beta)$ et $g(\pi) = 0$. Un exemple d'une telle fonction g étrange est celle qui attribue la valeur 0 à n'importe quel multiple rationnel de π et la valeur 1 à un ensemble de base des multiples irrationnels de π. Les valeurs pour tous les angles dièdres du polyèdre peuvent alors être obtenues par une combinaison de multiples rationnels de ces angles de base. En utilisant cette fonction, vous devez alors déduire par vous-même qu'un cube ne peut pas être découpé en un tétraèdre régulier parce que leurs invariants de Dehn respectifs sont différents**.

Défi 46 s

En dépit de ces difficultés relatives aux invariants de Dehn, nous *pouvons* définir un concept rigide et additif du volume pour les polyèdres, puisque pour tous les polyèdres et, plus généralement, pour toutes les formes « régulièrement courbées », nous pouvons encore utiliser l'intégration pour la définition de leur volume.

À présent considérons les formes générales et les découpages généraux en trois dimensions, et plus seulement les « réguliers » décrits plus haut. Nous butons alors sur le célèbre théorème (ou paradoxe) de *Banach-Tarski*. En 1924, Stefan Banach et Alfred Tarski*** prouvèrent qu'il est possible de découper une sphère en cinq morceaux qu'on peut ré-assembler pour donner deux sphères, chacune de la taille de l'original. Ce résultat contre-intuitif est le théorème de Banach-Tarski. Pis encore, une autre variante du théorème affirme ceci : prenez deux formes quelconques qui ne se prolongent pas à l'in-

Réf. 34

* Max Dehn (1878–1952), mathématicien allemand, élève de David Hilbert.

** Cela est également expliqué dans le magnifique livre de M. Aigler & G. M. Ziegler, *Proofs from the Book*, Springer Verlag, 1999. Le titre est attribuable à la célèbre habitude qu'avait le grand mathématicien Paul Erdös d'imaginer que toutes les belles démonstrations mathématiques pouvaient être assemblées dans un « recueil des démonstrations ».

*** Alfred Tarski (n. Varsovie 1902, d. Berkeley 1983), mathématicien polonais.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

fini et contenant chacune une sphère solide, alors il est toujours possible de transformer l'une en l'autre en un nombre *fini* de découpages. En particulier il est possible de transformer un petit pois en la Terre, ou vice versa. La taille ne compte pas* ! Le volume n'est donc pas du tout un concept utile.

Le théorème de Banach-Tarski soulève deux questions : premièrement, ce résultat peut-il s'appliquer à l'or ou au pain ? Cela permettrait de résoudre de nombreux problèmes. Deuxièmement, peut-il être appliqué à l'espace vide ? En d'autres termes, la matière et l'espace vide sont-ils continus ? Ces deux sujets seront étudiés plus tard dans notre exploration ; chaque résultat aura sa propre conséquence. Pour le moment, nous faisons l'impasse sur ce problème déroutant en restreignant notre intérêt aux formes continûment courbées (et aux découpages). Avec cette restriction, les volumes de matière et d'espace vide se conduisent merveilleusement bien : ils sont additifs et rigides, et ne soulèvent aucune contradiction. En réalité, les découpages requis pour le paradoxe de Banach-Tarski ne sont pas uniformes : il est impossible de les réaliser avec un couteau classique, puisqu'ils exigent un nombre infini d'angles infiniment aigus découpés avec un couteau infiniment tordu. Un tel couteau n'existe pas. Cependant, gardons dans un coin de notre tête l'idée que la taille d'un objet ou d'un morceau d'espace vide est une quantité subtile – et que nous avons besoin d'être prudent à chaque fois que nous discutons de cela.

Défi 47 s

Qu'est-ce qu'une ligne droite ?

Lorsque vous regardez un objet massif possédant une arête droite, il est sûr à 99 % qu'il a été fabriqué par l'homme**. La discordance entre les objets observés dans une ville – les immeubles, les bureaux, les voitures, les poteaux électriques, les boîtes, les livres – et les objets rencontrés dans une forêt – les arbres, les plantes, les cailloux, les nuages – est flagrante : dans la forêt rien n'est droit ou plat, dans la ville la majorité des objets le sont. Comment est-il envisageable que les hommes aient pu fabriquer des objets droits alors que l'on n'en rencontre aucun dans la nature ?

Chaque forêt nous renseigne sur l'origine de la rectitude. Elle présente des troncs d'arbre de haute taille et des rayons de lumière du jour qui filtrent du haut à travers le feuillage. Pour cette raison nous qualifions une ligne de *droite* si elle est en contact avec un fil à plomb ou un rayon de lumière sur toute sa longueur. En fait, les deux définitions sont équivalentes. Pouvez-vous confirmer cela ? Pouvez-vous trouver une autre définition ? Indubitablement, nous qualifions une surface de *plate* si, pour n'importe quelles direction et position, elle est en contact avec un fil à plomb ou un rayon de lumière le long de toute son étendue.

Défi 48 s

* La démonstration de ce résultat ne nécessite pas de connaître beaucoup de mathématiques : elle est admirablement expliquée par Ian Stewart dans Paradox of the spheres, *New Scientist*, 14 janvier 1995, pp. 28–31. Le paradoxe de Banach-Tarski existe également en quatre dimensions, ainsi que dans n'importe quel nombre de dimensions plus élevé. Vous trouverez davantage de précisions mathématiques dans le magnifique livre de Stan Wagon.

Réf. 35

** Les contre-exemples les plus courants sont les nombreux minéraux cristallins, où la rectitude est liée à la structure atomique. Une autre exception célèbre est la formation géologique irlandaise bien connue dénommée la Chaussée des Géants. D'autres cas qui pourraient venir à l'esprit, comme certaines bactéries ayant des formes (approximativement) carrées ou (approximativement) triangulaires ne sont pas des contre-exemples, puisque ces formes ne sont qu'approximatives.

Réf. 36

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 16 Une photographie de la Terre – vue depuis la direction du Soleil.

En résumé, la notion de rectitude – et ainsi également celle de platitude – est définie à l'aide de corps matériels ou de rayonnement. En réalité, tous les concepts spatiaux, de même que tous les concepts temporels, ont besoin du mouvement pour leur définition.

Une Terre creuse ?

L'espace et la ligne droite posent de délicats défis. Certaines personnes excentriques soutiennent que tous les hommes vivent *à l'intérieur* d'une sphère. Ils nomment (habituellement) cela la *théorie de la Terre creuse*. Ils prétendent que la Lune, le Soleil et les astres sont tous proches du centre de la sphère creuse. Ils expliquent aussi que la lumière suit des trajets courbés dans le ciel et ainsi que, lorsque les physiciens classiques parlent de la distance r au centre de la Terre, la distance réelle au centre de la Terre creuse est $r_{\text{tc}} = R_{\text{Terre}}^2/r$. Pouvez-vous montrer que ce modèle est faux ? Roman Sexl* posait régulièrement cette question à ses étudiants et collègues physiciens. La réponse est simple : si vous pensez détenir un argument pour montrer que cette idée est erronée, vous vous fourvoyez ! Il n'y a *aucune manière* de montrer qu'un tel point de vue est faux. Il est possible de décrire l'horizon, l'apparition du jour et de la nuit, ainsi que les photographies de satellites de la Terre ronde, comme celle de la Figure 16. Expliquer ce qui se produirait pendant un vol vers la Lune serait également amusant. Le point de vue logique sur

Défi 49 s

Défi 50 e

* Roman Sexl (1939–1986), physicien autrichien renommé, auteur de plusieurs ouvrages influents sur la gravitation et la relativité.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 17 Une image illustrant la théorie de la Terre creuse, montrant comment le jour et la nuit apparaissent. (© Helmut Diehl)

la Terre creuse est complètement *équivalent* à l'image familière d'un espace infiniment étendu. Nous reviendrons sur ce problème dans la section sur la relativité générale.

Page 263

Curiosités et défis amusants sur l'espace et le temps quotidiens

L'espace et le temps conduisent à de nombreuses questions stimulantes pour la réflexion.

* *

Comment mesure-t-on la vitesse d'une balle de pistolet avec un chronomètre, dans un espace de 1 m^3, sans électronique ? Indice : la même méthode peut aussi être utilisée pour mesurer la vitesse de la lumière.

Défi 51 s

* *

Imaginez un point noir sur une surface blanche. Quelle est la couleur de la ligne séparant le point du fond ? Cette question est couramment appelée énigme de Peirce.

Défi 52 s

* *

Le pain est aussi (approximativement) une fractale irrégulière. La dimension fractale du pain se situe autour de 2,7. Essayez de la mesurer.

Défi 53 s

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

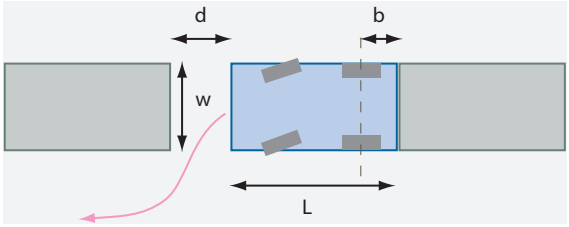


FIGURE 18 Quitter un emplacement de stationnement.

La conduite automobile soulève de nombreux problèmes mathématiques. Un des plus importants est le problème du stationnement suivant : quelle est la distance d la plus courte jusqu'au véhicule d'en face, nécessaire pour quitter un emplacement de stationnement sans utiliser la marche arrière ? (Admettez que vous connaissez la géométrie de votre véhicule, comme indiqué dans la Figure 18, ainsi que son plus petit rayon de virage extérieur R, qui est connu pour chaque voiture.) Question suivante : quel est le plus petit espacement requis lorsque vous avez la possibilité de manœuvrer d'avant en arrière aussi souvent que vous le voulez ? Maintenant un problème pour lequel aucune solution ne semble être donnée dans la littérature : comment cet espacement dépend-il du nombre n de fois que vous utilisez la marche arrière ? (L'auteur offre 50 euros à la première solution correctement exposée qui lui sera envoyée.)

Défi 54 s

Défi 55 s

Défi 56 s

* *

Combien de fois en 24 heures les aiguilles des heures et des minutes d'une horloge se trouvent-elles l'une sur l'autre ? Pour les horloges qui ont également une aiguille des secondes, combien de fois les trois aiguilles se trouvent-elles superposées ?

Défi 57 s

* *

Combien de fois en douze heures les deux aiguilles d'une horloge peuvent-elles être *permutées* avec comme conséquence que la nouvelle situation indique un temps *valide* ? Que se passe-t-il pour des horloges qui ont également une troisième aiguille pour les secondes ?

Défi 58 s

* *

De combien de minutes la Terre tourne-t-elle en une minute ?

Défi 59 s

* *

Quelle est la vitesse la plus élevée atteinte par un lancer (avec ou sans raquette) ? Quel projectile fut utilisé ?

Défi 60 s

* *

Une corde est posée tout autour de la Terre, sur l'équateur, aussi serrée que possible. La corde est ensuite rallongée de 1 m. Une souris peut-elle se faufiler sous celle-ci ?

Défi 61 s

* *

Jacques rame dans son bateau sur une rivière. Lorsqu'il se trouve sous un pont, il lâche

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 10 La notation exponentielle : comment écrire des petits et des grands nombres.

Nombre	Notation exponentielle	Nombre	Notation exponentielle
1	10^0		
0,1	10^{-1}	10	10^1
0,2	$2 \cdot 10^{-1}$	20	$2 \cdot 10^1$
0,324	$3,24 \cdot 10^{-1}$	32,4	$3,24 \cdot 10^1$
0,01	10^{-2}	100	10^2
0,001	10^{-3}	1 000	10^3
0,000 1	10^{-4}	10 000	10^4
0,000 01	10^{-5} etc.	100 000	10^5 etc.

un ballon dans la rivière. Jacques continue à ramer dans la même direction pendant 10 minutes après qu'il a lâché le ballon. Il fait alors demi-tour et rame dans l'autre sens. Lorsqu'il parvient au ballon, le ballon a flotté sur 600 m depuis le pont. Quelle est la
Défi 62 s vitesse du courant de la rivière ?

* *

Adam et Bert sont frères. Adam a 18 ans. Bert est deux fois plus vieux qu'au temps où Adam avait l'âge qu'a Bert maintenant. Quel est l'âge de Bert ?

* *

Les scientifiques utilisent une manière particulière pour écrire des petits et des grands nombres, elle est illustrée dans le Tableau 10.

Réf. 37 En 1996 la plus petite distance vérifiée expérimentalement fut 10^{-19} m, atteinte entre des quarks au Fermilab. (Pour savourer l'importance de cette distance, écrivez tous les chiffres sans l'exposant.) Que signifie cette mesure par rapport à la continuité de l'es-
Défi 63 s pace ?

* *

« Où suis-je ? » est une question usuelle. « Quand suis-je ? » n'est jamais posée, pas plus
Défi 64 s que dans d'autres langues. Pourquoi ?

* *

Défi 65 s Y a-t-il un intervalle de temps minimum dans la nature ? Une distance minimale ?

* *

En supposant que vous savez ce qu'est une ligne droite, comment caractériseriez-vous ou définiriez-vous la courbure d'une ligne incurvée en utilisant des nombres ? Et celle
Défi 66 s d'une surface ?

* *

Défi 67 s Quelle est la vitesse de votre battement de paupière ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

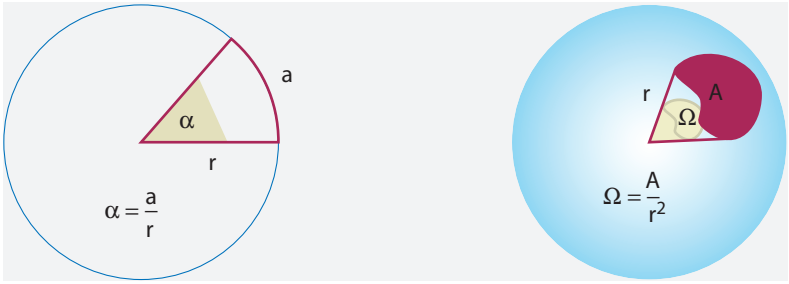


FIGURE 19 La définition des angles plan et solide.

* *

Défi 68 s L'aire de la surface du corps humain est d'environ 200 m^2. Pouvez-vous dire d'où vient ce nombre gigantesque ?

* *

Les fractales en trois dimensions donnent naissance à de nombreuses surprises. Prenez un tétraèdre régulier, collez alors sur chacune de ses faces triangulaires un tétraèdre régulier plus petit, de telle façon que la surface du solide soit à nouveau constituée de plusieurs triangles réguliers égaux. Répétez cette opération, en collant toujours des tétraèdres plus petits sur ces nouvelles surfaces triangulaires (plus nombreuses). Quelle est la forme de
Défi 69 s la fractale résultante après un nombre infini d'opérations ?

* *

Zénon méditait sur ce qui arriverait à un objet en mouvement à un instant donné du temps. Pour discuter avec lui, vous décidez de construire l'obturateur pour appareil photographique le plus rapide possible que vous puissiez imaginer. Vous avez tout l'argent
Défi 70 s que vous désirez. Quel est le plus petit temps d'obturation que vous puissiez réaliser ?

* *

Pouvez-vous démontrer le théorème de Pythagore de manière géométrique seulement,
Défi 71 s sans utiliser des coordonnées ? (Il y a plus de 30 solutions.)

* *

Défi 72 s Pourquoi la plupart des planètes et des lunes sont-elles (à peu près) sphériques ?

* *

Un fil élastique joint les extrémités des deux aiguilles d'une horloge. Quel est le chemin
Défi 73 s suivi par le point situé au milieu du fil ?

* *

Il existe deux grandeurs importantes reliées aux angles. Comme indiqué sur la Figure 19, ce qui est communément appelé un *angle (plan)* est défini comme étant le rapport entre les longueurs de l'arc et du rayon. Un angle droit est égal à $\pi/2$ radian (ou $\pi/2$ rad) ou 90°. L'*angle solide* est le rapport entre l'aire et le carré du rayon. Un huitième d'une sphère est égal à $\pi/2$ steradian ou $\pi/2$ sr. En conséquence, un petit angle solide en forme

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

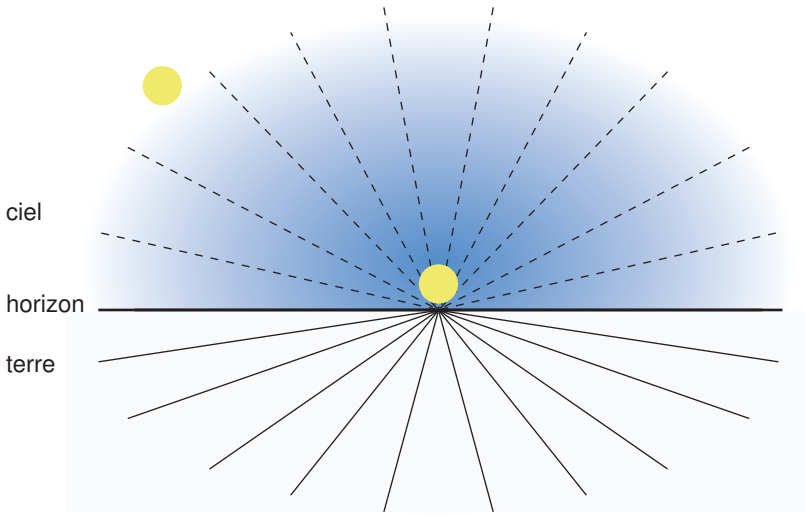


FIGURE 20 Comment la taille apparente de la Lune et celle du Soleil changent.

de cône et l'angle de l'extrémité du cône sont *différents*. Pouvez-vous trouver la relation
Défi 74 s liant ces deux grandeurs ?

* *

La définition de l'angle permet de déterminer la taille de l'explosion d'un feu d'artifice. Évaluez le temps T, en secondes, entre le moment où vous voyez la fusée exploser dans le ciel et le moment où vous entendez l'explosion, mesurez l'angle (plan) α de la boule avec votre main. Le diamètre D est

$$D \approx 6\,\mathrm{s}/^\circ \; T\,\alpha \; . \tag{3}$$

Défi 75 e Pourquoi ? Pour en savoir plus sur les feux d'artifice, consultez le site Web http://cc.oulu.fi/~kempmp. Autre exemple : la distance angulaire entre les osselets d'un poing situé à bout de bras sont à peu près de 3°, 2° et 3°, la taille d'une main étendue, 20°. Pouvez-vous
Défi 76 s déterminer les autres angles en rapport avec votre main ?

* *

Il est difficile d'évaluer la taille angulaire uniquement avec l'œil. Par exemple, pouvez-vous dire si la Lune est plus grande ou plus petite que l'ongle situé sur votre pouce à
Défi 77 e l'extrémité de votre bras tendu ? La taille angulaire n'est pas une grandeur intuitive. Elle nécessite d'utiliser des instruments de mesure.

Un exemple célèbre, indiqué sur la Figure 20, illustre la difficulté d'estimer des angles. Le Soleil et la Lune semblent tous les deux plus grands lorsqu'ils sont à l'horizon. Dans l'ancien temps, Ptolémée expliqua cette illusion par une modification inconsciente de la distance apparente opérée par le cerveau humain. En réalité, la Lune est même *beaucoup plus éloignée* de l'observateur lorsqu'elle est juste au-dessus de l'horizon, et donc son image est *plus petite* que celle qu'elle avait quelques heures plus tôt, quand elle était haute
Défi 78 s dans le ciel. Pouvez-vous confirmer cela ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

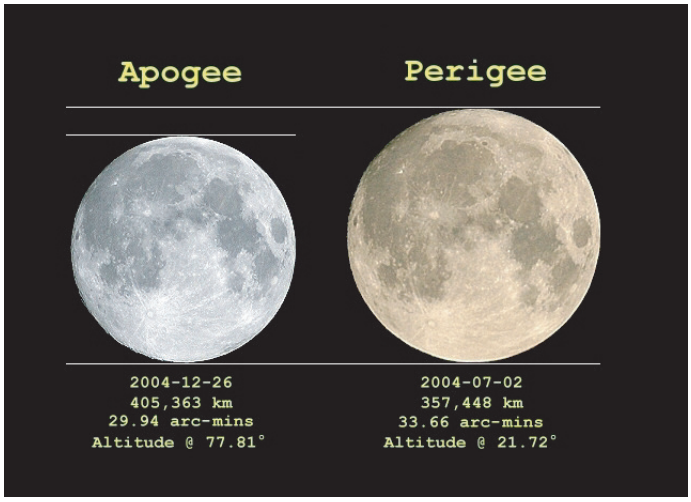


FIGURE 21 Comment la taille apparente de la Lune est modifiée durant son trajet orbital. (© Anthony Ayiomamitis)

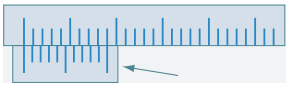


FIGURE 22 Un vernier/nonius/clavius.

En fait, la taille de la Lune change beaucoup plus à cause d'un autre effet : l'orbite de la Lune est elliptique. Un exemple de tout cela est montré sur la Figure 21.

* *

Des cylindres peuvent être utilisés pour faire rouler un objet plat sur le sol. Ils gardent l'objet plat toujours à la même distance du sol. Quelle figure dont la coupe transversale est *autre* que circulaire vous permet de réaliser la même prouesse ? Combien d'exemples
Défi 79 s pouvez-vous trouver ?

* *

Galilée fit aussi des erreurs. Dans son livre célèbre, les *Dialogues*, il affirma que la courbe formée par une fine chaînette suspendue entre deux clous est une parabole, c'est-à-dire
Défi 80 d la courbe définie par $y = x^2$. Cela n'est pas exact. Quelle est la véritable courbe ? Vous pouvez observer (approximativement) cette forme dans la figure des ponts suspendus.

* *

Comment fonctionne un *vernier* ? Il est appelé *nonius* dans d'autres langues. Le premier nom est dérivé d'un ingénieur militaire français* qui ne l'inventa pas, le second est un mot dérivé du nom latinisé de l'inventeur portugais d'un appareil plus élaboré** et du terme latin désignant « neuf ». En réalité, le dispositif tel qu'il est connu aujourd'hui –

* Pierre Vernier (1580–1637), officier militaire français passionné de cartographie.
** Pedro Nuñes ou Peter Nonnius (1502–1578), mathématicien et cartographe portugais.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 23 Rayons anticrépusculaires. (© Peggy Peterson)

montré sur la Figure 22 – fut conçu autour de 1600 par Christophorus Clavius*, le même astronome qui fit des recherches qui établirent le fondement de la réforme du Calendrier grégorien de 1582. Êtes-vous capable de concevoir un vernier/nonius/clavius qui, au lieu
Défi 81 s d'augmenter la précision d'un facteur 10, le fait d'un facteur arbitraire ? Y a-t-il une limite à la précision accessible ?

* *

Dessinez trois cercles, de tailles différentes, qui se touchent les uns les autres. Maintenant dessinez un quatrième cercle dans l'espace du milieu, qui touche les trois à l'extérieur.
Défi 82 s Quelle relation simple vérifie l'inverse du rayon des quatre cercles ?

* *

Prenez un tétraèdre OABC dont les côtés OAB, OBC, OAC sont rectangles en O. En d'autres termes, OA, OB et OC sont tous perpendiculaires les uns aux autres. Dans le tétraèdre, les aires des triangles OAB, OBC, OAC sont respectivement 8, 4 et 1. Quelle
Défi 83 s est l'aire du triangle ABC ?

* *

Avec deux règles, vous pouvez additionner et soustraire des nombres en les couchant l'une près de l'autre. Êtes-vous capable de réaliser des règles qui vous permettent de
Défi 84 s multiplier et diviser de la même façon ? Des dispositifs plus élaborés utilisant ce principe sont appelés *règles de calcul* et furent les précurseurs des calculateurs électroniques. Ils furent utilisés partout dans le monde jusqu'aux années 1970.

* *

Combien de jours compterait une année si la Terre tournait dans l'autre sens avec la
Défi 85 s même vitesse de rotation ?

* *

Défi 86 s Où se trouve le Soleil dans la situation spectaculaire montrée sur la Figure 23 ?

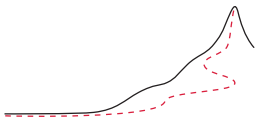
* Christophorus Clavius ou Schlüssel (1537–1612), astronome bavarois.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Réf. 38 Un univers bidimensionnel peut-il exister ? Alexander Dewdney décrivit un tel univers dans un livre. Pouvez-vous expliquer pourquoi un univers bidimensionnel ne peut pas
Défi 87 d exister ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 3

COMMENT DÉCRIRE LE MOUVEMENT – LA CINÉMATIQUE

> « La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo) ... Egli è scritto in lingua matematica*. »
>
> Galileo Galilei, *Il saggiatore* VI.

Les expériences dévoilent que la plupart des animaux supérieurs et les jeunes enfants extraient les propriétés de l'espace et du temps galiléens de leur environnement. Plus tard, lorsque les enfants apprennent à parler, ils transposent ces expériences dans des concepts, de même que nous venons de faire ci-dessus. À l'aide de ces concepts, les enfants qui ont grandi disent alors que *le mouvement est le changement de position dans le temps*. Cette représentation est illustrée par le feuilletage rapide des coins inférieurs gauches de ce livre, en commençant à la page 169. Chaque page simule un instant du temps, et le seul changement qui a lieu durant le mouvement est celui de la position de l'objet, représenté par le point sombre. Les autres fluctuations d'une image à la suivante, qui sont imputables aux imperfections des techniques d'impression, peuvent être assimilées aux erreurs inévitables des mesures.

Il est manifeste qu'appeler « mouvement » le changement de la position dans le temps n'est *ni* une explication *ni* une définition puisque les deux notions de temps et de position sont déduites du mouvement lui-même. C'est seulement une *description* du mouvement. En revanche, la description est opportune parce qu'elle permet d'obtenir une précision élevée, comme nous le découvrirons en explorant la gravitation et l'électrodynamique. Après tout, la précision est notre fil conducteur durant cette excursion. De plus, la description précise des changements de position possède une dénomination appropriée : elle est nommée *cinématique*.

L'ensemble de toutes les positions prises par un objet dans le temps forme un *trajet* ou une *trajectoire*. La source de ce concept est flagrante lorsque nous regardons un feu d'artifice** ou encore le film saccadé précédemment mentionné situé dans les coins en bas à gauche après la page 169. Avec la description de l'espace et du temps par des nombres réels, une trajectoire peut être décrite en spécifiant ses trois coordonnées (x, y, z) – une pour chaque dimension – comme des fonctions continues du temps t. (Les fonctions

* La science est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours ouvert devant nos yeux (je veux dire l'univers) ... Il est écrit en langage mathématique.

** Sur le monde des feux d'artifice, consultez la liste des questions fréquemment posées sur le forum de discussion rec.pyrotechnics, ou cherchez sur le Web. Une introduction simple se trouve dans l'article de J. A. Conkling, Pyrotechnics, *Scientific American* pp. 66–73, juillet 1990.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

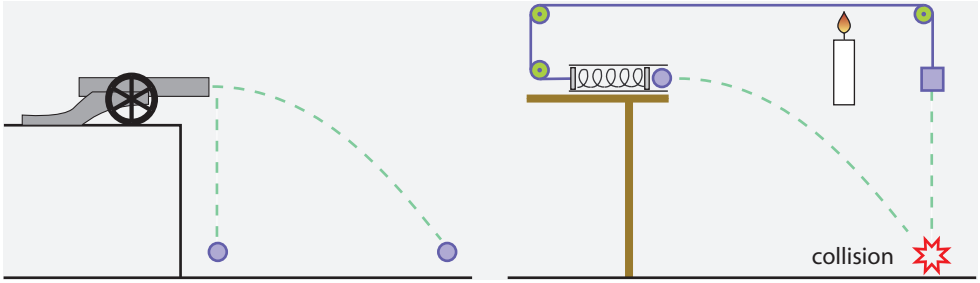


FIGURE 24 Deux manières de tester le fait que la durée de la chute libre ne dépend pas de la vitesse horizontale.

sont précisées en détail à la page **??**.) Elles sont généralement notées de la manière suivante $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = (x(t), y(t), z(t))$. Par exemple, l'observation montre que la hauteur z de n'importe quelle pierre jetée ou en chute varie comme

$$z(t) = z_0 + v_0(t - t_0) - \tfrac{1}{2}g(t - t_0)^2 \tag{4}$$

où t_0 est l'instant où la chute commence, z_0 est la hauteur initiale, v_0 est la vitesse initiale dans la direction verticale et $g = 9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$ est une constante qui est établie comme étant la même, dans la limite d'une partie pour 300, pour tous les corps chutant sur tous les
Réf. 39 points de la surface de la Terre. D'où vient la valeur $9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$ et ses variations ténues ? Une réponse préliminaire sera donnée sous peu, mais l'éclaircissement complet nous accaparera pendant la plus grande partie de cette promenade.

L'équation (4) nous permet de déterminer la profondeur d'un puits, sachant le temps
Défi 88 s que met une pierre pour parvenir au fond. L'équation nous donne également la vitesse v avec laquelle nous atteignons le sol après avoir sauté d'un arbre, à savoir $v = \sqrt{2gh}$. Une hauteur de 3 m engendre une vitesse de 27 km/h. La vitesse est donc proportionnelle à la racine carrée de la hauteur seulement. Cela signifie-t-il que notre forte crainte de la
Défi 89 s chute résulte d'une surestimation de ses véritables effets ?

Galilée fut le premier à établir un résultat primordial à propos de la chute libre : les mouvements dans les directions horizontale et verticale sont *indépendants*. Il montra que le temps que met un boulet de canon tiré exactement horizontalement pour chuter est *indépendant* de la vigueur de la poudre à canon, comme indiqué sur la Figure 24. Beaucoup de grands savants ne furent pas d'accord avec cette affirmation, même après sa
Réf. 40 mort : en 1658, l'Academia del Cimento organisait encore une expérience pour vérifier cette assertion, en confrontant un boulet de canon tiré en l'air avec un autre qui tombait seulement verticalement. Pouvez-vous imaginer comment ils contrôlèrent la simul-
Défi 90 s tanéité ? La Figure 24 montre également comment vous pouvez vérifier ceci chez vous. Dans cette expérience, quelle que soit la charge de la poudre dans le canon, les deux projectiles entreront toujours en collision entre ciel et terre (si la table est assez haute), démontrant ainsi l'assertion.

En d'autres termes, un boulet de canon n'est pas accéléré dans la direction horizontale. Sont mouvement horizontal reste simplement inchangé. En étendant la description

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

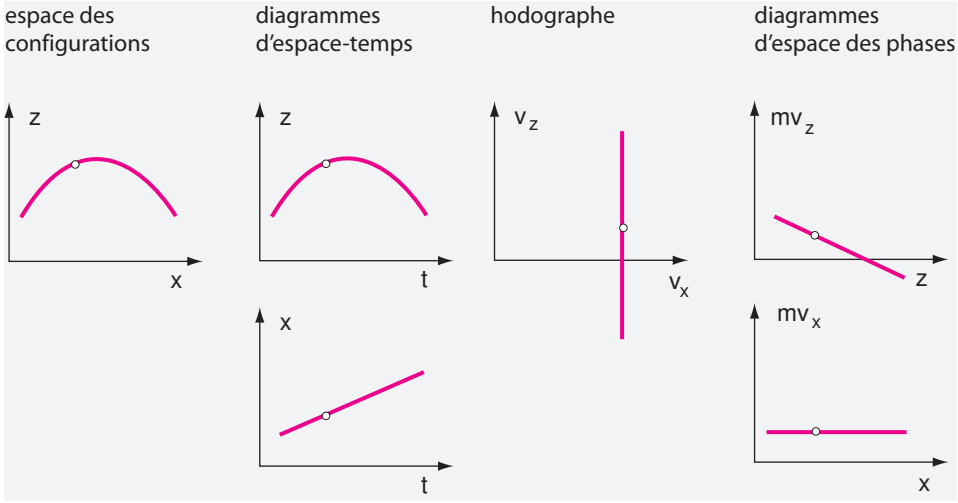


FIGURE 25 Divers types de graphiques décrivant la même trajectoire d'une pierre jetée.

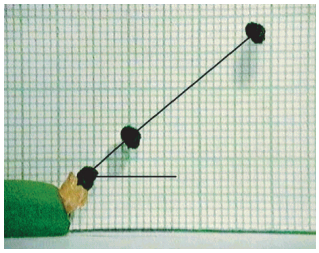


FIGURE 26 Trois images superposées d'une boulette d'excréments tirée par une chenille. (© Stanley Caveney)

de l'équation (4) aux deux expressions des coordonnées horizontales x et y, soit

$$x(t) = x_0 + v_{x0}(t - t_0)$$
$$y(t) = y_0 + v_{y0}(t - t_0)\,, \qquad (5)$$

une description *exhaustive* des trajectoires suivies par les pierres lancées en résulte. Une trajectoire de cette forme est nommée une *parabole*. Elle est présentée sur les Figures 10, 24 et 25*. Une figure parabolique est également utilisée pour les réflecteurs lumineux dans les lampes de poche ou les phares de voiture. Pouvez-vous montrer pourquoi ?

Défi 91 s

Le jet et le tir

La description cinématique du mouvement est utile pour répondre à un pan entier d'interrogations.

* Excepté pour les graphiques représentés sur la Figure 25, il y a également l'*espace des configurations* occupé par les coordonnées de toutes les particules d'un système. Pour une particule seule uniquement il est égal à l'espace réel. Le diagramme de l'espace des phases est également appelé diagramme d'espace des états.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Réf. 41 De nombreuses chenilles d'espèces de papillons de nuit et de jour projettent leurs déjections – pour le dire plus grossièrement : leur merde – de telle façon que leurs odeurs n'aident pas les prédateurs à les localiser. Stanley Caveney et son équipe ont pris des photos de ce comportement. La Figure 26 montre une chenille (jaune) de l'espèce *Calpodes ethlius* (Hesperiidae) à l'intérieur d'une feuille verte enroulée prise sur le fait. Sachant que le record de la distance observée est 1,5 m (bien qu'il s'agisse d'une autre espèce, Défi 92 s *Epargyreus clarus*), quelle est la vitesse d'éjection ? Comment les chenilles accomplissent-elles cela ?

* *

Défi 93 s Quelle est la distance horizontale que nous pouvons atteindre avec une pierre, connaissant la vitesse et l'angle par rapport à l'horizontale avec lesquels elle est lancée ?

* *

Défi 94 s Page 17 Comment la vitesse de la pluie tombante peut-elle être mesurée en utilisant un parapluie ? Cette méthode peut également être utilisée pour évaluer la vitesse de la lumière.

* *

Défi 95 s Quel est le nombre maximum de balles avec lesquelles on peut jongler en même temps ?

* *

Réf. 42 La découverte d'une limite maximale pour le saut en longueur est intéressante. Le record mondial de la vitesse du sprint en 1997 était de 12 m/s ≈ 43 km/h par Ben Johnson, et le record féminin était de 11 m/s ≈ 40 km/h. En réalité, les athlètes du saut en longueur ne courent jamais plus vite qu'environ 9,5 m/s. Quelle distance supplémentaire de saut pourraient-ils atteindre s'ils pouvaient courir à la vitesse maximale ? Comment pourraient-ils réaliser cette performance ? De plus, les athlètes du saut en longueur Réf. 43 s'élancent d'un angle d'environ 20°, puisqu'ils ne sont pas capables d'atteindre un angle supérieur à cause de la vitesse à laquelle ils courent. De quelle longueur supplémentaire Défi 96 s pourraient-ils bénéficier s'ils pouvaient atteindre 45° ?

* *

Défi 97 s Est-il vrai que la chute d'une averse pourrait tuer s'il n'y avait pas la résistance de l'air de l'atmosphère ? Qu'en est-il pour la glace ?

* *

Défi 98 s Les balles tirées par un revolver qui tombe à la renverse dans le vide sous l'effet de la détonation sont-elles dangereuses ?

Les deux derniers problèmes se posent parce que l'équation (4) ne s'applique pas dans tous les cas. Par exemple, la chute des feuilles ou des chips ne la vérifie pas. Comme Galilée l'avait déjà compris, c'est une conséquence de la résistance de l'air. Nous en parlerons bientôt. En réalité, même sans la résistance de l'air, le trajet suivi par une pierre n'est pas Défi 99 s toujours une parabole : pouvez vous découvrir une telle situation ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

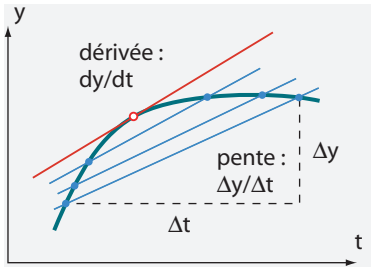


FIGURE 27 Dérivées.

Qu'est-ce que le repos ?

Dans le tableau que Galilée brosse de la nature, le mouvement et le repos sont antagonistes. Dit autrement, un corps est au repos lorsque sa position, c'est-à-dire ses coordonnées, ne varie pas au cours du temps. De cette façon, le *repos* (galiléen) est défini comme suit :

$$\mathbf{x}(t) = \text{const} \,. \tag{6}$$

Plus tard, nous verrons que cette définition, contrairement à notre première impression, n'est pas très fructueuse et nécessite d'être retouchée. La définition du repos implique que les objets non stationnaires peuvent être discernés en comparant la rapidité de leur déplacement. Nous pouvons donc définir la *vitesse* **v** d'un objet comme étant la variation de sa position **x** dans le temps t. Elle est communément écrite

$$\mathbf{v} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{x}}{\mathrm{d}t} \,. \tag{7}$$

Dans cette relation, valable pour chaque coordonnée prise séparément, $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ signifie « variation par rapport au temps ». Nous pouvons alors avancer que la vitesse est la *dérivée* de la position par rapport au temps. La *vitesse* v est égale à la grandeur du vecteur vitesse **v**. Les dérivées sont écrites comme des fractions pour rappeler au lecteur qu'elles proviennent de la notion de pente. L'expression

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} \quad \text{est prise dans le sens d'une forme raccourcie de} \quad \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \,, \tag{8}$$

c'est une manière abrégée pour signifier que la *dérivée en un point* est la limite des pentes au voisinage de ce point, comme indiqué sur la Figure 27. Cette définition implique les règles de dérivation suivantes :

Défi 100 e

$$\frac{\mathrm{d}(y+z)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \,, \quad \frac{\mathrm{d}(cy)}{\mathrm{d}t} = c\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} \,, \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} \,, \quad \frac{\mathrm{d}(yz)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}z + y\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \,, \tag{9}$$

c étant n'importe quel nombre. C'est tout ce que nous aurons besoin de connaître sur les dérivées. Les quantités $\mathrm{d}t$ et $\mathrm{d}y$, parfois elles-mêmes utiles, sont appelées des *diffé-*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 28 Gottfried Leibniz.

rentielles. Ces concepts sont dus à Gottfried Wilhelm von Leibniz*. Les dérivées sont à la base de tous les calculs fondés sur la continuité de l'espace et du temps. Leibniz fut la personnalité qui rendit possible la description et l'utilisation de la vitesse dans la formulation physique et, en particulier, l'application aux calculs de l'idée de vitesse en un point donné dans le temps ou dans l'espace.

La définition de la vitesse présuppose qu'il y a un sens à considérer la limite $\Delta t \to 0$. En d'autres termes, il est admis que des intervalles infiniment petits de temps existent dans la nature. La définition de la vitesse avec les dérivées est possible uniquement parce que l'espace et le temps sont tous deux décrits par des ensembles qui sont *continus* ou, en langage mathématique, *connexes et complets*. Dans la suite de notre promenade, nous devrons nous rappeler que, depuis la naissance de la physique classique, les *infinis* se manifestent dans la représentation de la nature. L'infiniment petit fait partie intégrante de notre définition de la vitesse. En fait, le calcul différentiel peut être défini comme étant l'étude de l'infini et de ses applications. Nous nous apercevons alors que l'apparition de l'infini n'implique pas systématiquement qu'une description soit irréalisable ou imprécise. Afin de rester précis, les physiciens emploient seulement ces deux espèces les plus petites des divers infinis possibles. Leur définition concise et un aperçu des autres types sont introduits dans l'entracte qui suit ce chapitre.

Page ??

L'avènement de l'infini dans la description classique du mouvement fut d'abord vilipendé par Zénon d'Élée (vers 445 AV. J.-C.), un disciple de Parménide, dans ses célèbres paradoxes sarcastiques. Dans son troisième paradoxe, ainsi nommé, Zénon explique que, puisque à chaque instant un objet donné séjourne dans une région de l'espace correspondant à sa taille, la notion de vitesse à un instant donné n'a aucun sens ; il conclut alors de manière ahurissante que le mouvement n'existe pas. De nos jours nous ne l'appellerions pas un paradoxe sur la *réalité* du mouvement, mais sur sa *description* classique, en particulier sur l'usage de l'espace et du temps infiniment divisibles. (Êtes-vous d'accord ?) Et pourtant, la description critiquée par Zénon fonctionne effectivement très bien dans la vie de tous les jours. La raison en est simple mais profonde : dans la vie quotidienne, les changements sont réellement continus.

Réf. 44

Défi 102 e

De grands changements dans la nature sont constitués d'un grand nombre de petits changements. Cette propriété de la nature n'est pas intuitive. Par exemple, nous notons

* Gottfried Wilhelm von Leibniz (n. Leipzig 1646, d. Hanovre 1716), historien, diplomate, philosophe, mathématicien, physicien et homme de loi allemand. Il fut un des grands esprits de l'humanité, il inventa le calcul différentiel (avant Newton) et publia beaucoup d'ouvrages à succès dans les divers domaines qu'il explora, dont *De arte combinatoria*, *Hypothesis physica nova*, *Discours de métaphysique*, *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, *Essais de théodicée* et *Monadologie*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 11 Quelques valeurs d'accélérations mesurées.

OBSERVATION	ACCÉLÉRATION
Quelle est la plus petite accélération que vous puissiez trouver ?	Défi 101 s
Accélération de la galaxie M82 due à son jet de matière	$10\,\mathrm{fm/s^2}$
Accélération d'une jeune étoile par un jet interstellaire	$10\,\mathrm{pm/s^2}$
Accélération du Soleil sur son orbite autour de la Voie lactée	$0{,}2\,\mathrm{nm/s^2}$
Décélération inexpliquée des satellites Pioneer	$0{,}8\,\mathrm{nm/s^2}$
Accélération à l'équateur due à la rotation de la Terre	$0{,}34\,\mathrm{mm/s^2}$
Accélération centrifuge due à la rotation de la Terre	$33\,\mathrm{mm/s^2}$
Accélération des électrons dans un câble électrique domestique due au courant alternatif	$50\,\mathrm{mm/s^2}$
Accélération gravitationnelle sur la Lune	$1{,}6\,\mathrm{m/s^2}$
Accélération gravitationnelle à la surface de la Terre, dépendant de la localisation précise	$9{,}8 \pm 0{,}1\,\mathrm{m/s^2}$
Accélération gravitationnelle standard	$9{,}806\,65\,\mathrm{m/s^2}$
L'accélération la plus élevée pour une voiture ou une motocyclette avec des roues motorisées	$15\,\mathrm{m/s^2}$
Accélération gravitationnelle à la surface de Jupiter	$240\,\mathrm{m/s^2}$
Accélération du guépard	$32\,\mathrm{m/s^2}$
Accélération au déclenchement des airbags dans les voitures	$360\,\mathrm{m/s^2}$
L'accélération la plus rapide fournie par des pattes (par l'aphrophore, *Philaenus spumarius*, un insecte)	$4\,\mathrm{km/s^2}$
Balle de tennis contre un mur	$0{,}1\,\mathrm{Mm/s^2}$
Accélération d'une balle dans un fusil	$5\,\mathrm{Mm/s^2}$
Centrifugeuse la plus rapide	$0{,}1\,\mathrm{Gm/s^2}$
Accélération de protons dans les grands accélérateurs de particules	$90\,\mathrm{Tm/s^2}$
Accélération de protons à l'intérieur du noyau atomique	$10^{31}\,\mathrm{m/s^2}$
La plus grande accélération possible dans la nature	$10^{52}\,\mathrm{m/s^2}$

que nous avons considéré tacitement que le trajet suivi par un objet n'est pas une fractale ou toute autre entité d'apparence complexe. Dans la vie quotidienne cela est juste mais, dans d'autres domaines de la nature, cela ne l'est pas. La méfiance de Zénon sera partiellement réhabilitée plus tard dans notre excursion, et de plus en plus encore à mesure
Page ??
que nous progresserons. Ce retournement de situation ne sera que partiel, au sens où la réponse sera différente de celle qu'il envisageait. D'un autre côté, le doute concernant l'idée de « vitesse instantanée » s'avérera bien fondé. Pour le moment, nous n'avons malgré tout pas le choix : nous continuons avec le postulat fondamental que, dans la nature, les changements se produisent de manière continue.

Pourquoi la vitesse est-elle un concept indispensable ? Pour aspirer à plus de précision dans la description du mouvement, nous avons besoin d'établir la liste complète des aspects nécessaires pour caractériser l'état d'un objet. La notion de vitesse est évidemment dans cette liste. En poursuivant sur notre lancée, nous appelons *accélération* **a** d'un corps

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

la variation de sa vitesse **v** par rapport au temps, soit

$$\mathbf{a} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2\mathbf{x}}{\mathrm{d}t^2} \,. \tag{10}$$

L'accélération est ce que nous ressentons lorsque la Terre tremble, qu'un avion décolle ou qu'une bicyclette tourne au coin d'une rue. Le Tableau 11 cite davantage d'exemples. Comme la vitesse, l'accélération possède à la fois une grandeur et une direction, propriétés signalées par l'utilisation des caractères **gras** pour leur notation*.

Défi 105 s

Des dérivées d'ordre plus élevé que l'accélération peuvent aussi être définies de la même manière. Elles sont sans intérêt pour la description de la nature, parce que, comme nous le verrons bientôt, ni celles-ci ni l'accélération elle-même ne sont utiles pour la description de l'état de mouvement d'un système.

Les objets et les particules ponctuelles

> Wenn ich den Gegenstand kenne, so kenne ich auch sämtliche Möglichkeiten seines Vorkommens in Sachverhalten**.
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 2.0123

Une perspective de l'étude du mouvement est de forger une description complète et précise des états et des objets à la fois. Grâce à la notion d'espace, la description des objets peut être considérablement affinée. En particulier, nous savons par expérience que tous les objets observés dans la vie quotidienne possèdent une propriété importante : ils peuvent être divisés en *parties*. Cette observation est souvent exprimée en disant que tous les objets, ou tous les corps, ont deux propriétés. Premièrement, ils sont constitués

Défi 106 e

* De telles quantités physiques sont appelées des *vecteurs*. Plus précisément, en langage mathématique, un vecteur est un élément d'un ensemble, appelé *espace vectoriel*, dans lequel les propriétés suivantes sont valables pour tout vecteur **a** et **b** et pour tout nombre c et d :

$$c(\mathbf{a}+\mathbf{b}) = c\mathbf{a} + c\mathbf{b} \quad , \quad (c+d)\mathbf{a} = c\mathbf{a} + d\mathbf{a} \quad , \quad (cd)\mathbf{a} = c(d\mathbf{a}) \quad \text{et} \quad 1\mathbf{a} = \mathbf{a} \,. \tag{11}$$

Un autre exemple d'espace vectoriel est l'ensemble de toutes les *positions* d'un objet. L'ensemble de toutes les rotations forme-t-il un espace vectoriel ? Tous les espaces vectoriels permettent la définition d'un unique vecteur nul et d'un seul vecteur opposé pour chaque vecteur de l'ensemble.

Défi 103 s

Remarquez que les vecteurs n'ont pas de points définis pour leur origine : deux flèches de même direction et même longueur sont deux vecteurs *identiques*, même si elles prennent leur départ en des points différents dans l'espace.

Dans de nombreux espaces vectoriels, la notion de *longueur* (caractérisant la « grandeur ») peut être introduite, généralement par le biais d'une étape intermédiaire. Un espace vectoriel est appelé *euclidien* si nous pouvons définir pour celui-ci un *produit scalaire* entre deux vecteurs, comme un nombre **ab** vérifiant

$$\mathbf{aa} \geqslant 0 \,,\ \mathbf{ab} = \mathbf{ba} \,,\ (\mathbf{a}+\mathbf{a}')\mathbf{b} = \mathbf{ab} + \mathbf{a}'\mathbf{b} \,,\ \mathbf{a}(\mathbf{b}+\mathbf{b}') = \mathbf{ab} + \mathbf{ab}' \text{ et } (c\mathbf{a})\mathbf{b} = \mathbf{a}(c\mathbf{b}) = c(\mathbf{ab}) \,. \tag{12}$$

Dans la notation en coordonnées cartésiennes, le produit scalaire standard est donné par $\mathbf{ab} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$. À chaque fois qu'il s'annule, les deux vecteurs sont *orthogonaux*. La *longueur* ou *norme* d'un vecteur peut alors être définie comme la racine carrée du produit scalaire d'un vecteur par lui-même : $a = \sqrt{\mathbf{aa}}$.

Le produit scalaire est également utile pour déterminer les directions. En fait, le produit scalaire entre deux vecteurs encode l'angle qu'ils font entre eux. Pouvez-vous déduire cette relation importante ?

Défi 104 s

** Si je connais un objet, je connais aussi toutes les occurrences possibles de ses états d'occupations.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

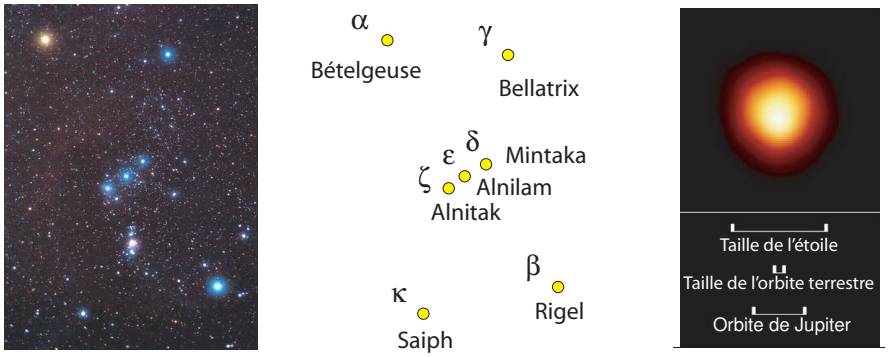


FIGURE 29 Orion (en couleurs naturelles) et Bételgeuse.

de *matière**, définie comme étant cet aspect d'un objet responsable de son impénétrabilité, c'est-à-dire la propriété qui empêche deux objets de se trouver au même endroit. Deuxièmement, les corps possèdent une certaine *forme* ou silhouette, définie comme étant la manière précise avec laquelle cette impénétrabilité est distribuée dans l'espace.

Afin de rendre compte du mouvement aussi fidèlement que possible, il est opportun de commencer avec les corps qui sont les plus élémentaires possible. En général, plus un corps est petit, plus il est simple. Un corps qui est si minuscule que ses parties ne nécessitent pas forcément d'être prises en compte est appelé une *particule*. (L'ancienne dénomination *corpuscule* est tombée aux oubliettes.) Les particules sont donc matérialisées comme de minuscules cailloux. Le cas extrême, une particule dont la taille est *négligeable* par rapport à la grandeur de son mouvement, de telle façon que sa position soit entièrement décrite par un *unique* triplet de coordonnées, est appelée une *particule ponctuelle* ou une *masse ponctuelle*. Dans l'équation (4), la pierre était assimilée à une particule ponctuelle.

Les objets assimilés à des points, c'est-à-dire les objets plus petits que tout ce que nous pouvons mesurer, existent-ils dans la vie quotidienne ? Oui et non. Les exemples les plus flagrants sont les étoiles. Aujourd'hui, des tailles angulaires aussi petites que 2 µrad peuvent être mesurées, cette limite étant fixée par les fluctuations de l'air dans l'atmosphère. Dans l'espace, comme pour le télescope Hubble en orbite autour de la Terre, la limite angulaire est fixée par le diamètre du télescope et est de l'ordre de 10 nrad. Pratiquement toutes les étoiles vues depuis la Terre sont plus petites que cette résolution et sont donc effectivement « comparables à des points », même lorsqu'elles sont observées avec les télescopes les plus performants.

Comme une exception à la règle générale, la taille de quelques grandes étoiles proches, de type géante rouge, peut être évaluée à l'aide d'instruments appropriés**. Bételgeuse,

Réf. 45

* Matière est un mot dérivé du Latin « materia », qui signifie à l'origine « bois » et est dérivé via des étapes intermédiaires de « mater » qui signifie « mère ».

** Le site Web http://www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sowlist.html fournit une introduction aux différents types d'étoiles. Le site Web http://www.astro.wisc.edu/~dolan/constellations/constellations.html donne des précisions et des informations intéressantes sur les constellations.

Pour un tour d'horizon sur les planètes, lisez le magnifique livre de K. R. LANG & C. A. WHITNEY, *Vagabonds de l'espace – Exploration et découverte dans le système solaire*, Springer Verlag, 1993. Les plus belles images d'étoiles peuvent être dénichées dans D. MALIN, *A View of the Universe*, Sky Publishing and

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

la plus brillante des deux épaules d'Orion, montrée dans la Figure 29, Mira dans la Baleine, Antarès du Scorpion, Aldébaran du Taureau et Sirius dans le Grand Chien sont des exemples d'étoiles dont la taille a été mesurée. Elles sont toutes à quelques années-lumière seulement de la Terre. Évidemment, comme le Soleil, toutes les autres étoiles ont une taille finie, mais nous ne pouvons pas démontrer cela en mesurant les dimensions sur les photographies. (Est-ce vrai ?)

Réf. 46

Défi 107 s

La différence entre des sources « ponctuelles » et celles de taille finie peut être remarquée à l'œil nu : la nuit, les étoiles scintillent, mais pas les planètes. (Vérifiez-le !) Cet effet est dû à la turbulence de l'air. La turbulence a un effet sur la plupart des étoiles assimilées à des points parce qu'elle dévie les rayons lumineux d'une petite quantité. D'un autre côté, la turbulence de l'air est trop faible pour provoquer le clignotement des sources de taille angulaire plus importante, telles que les planètes ou les satellites artificiels*, parce que la déviation est en moyenne compensée dans ce cas.

Défi 108 e

Un objet est *ponctuel pour l'œil nu* si sa taille angulaire est plus petite qu'environ $2' = 0{,}6$ mrad. Pouvez-vous estimer la taille d'une particule de poussière « ponctuelle » ? En fait, un objet est *invisible* à l'œil nu s'il est ponctuel *et* si sa luminosité, c'est-à-dire l'intensité de la lumière provenant de l'objet jusqu'à l'œil, est inférieure à une certaine valeur critique. Pouvez-vous deviner s'il existe des constructions humaines visibles depuis la Lune ou depuis la navette spatiale ?

Défi 109 s

Défi 110 s

La définition ci-dessus de « ponctuel » est manifestement trompeuse dans la vie quotidienne. Les particules ponctuelles véritablement réelles existent-elles ? En réalité, est-il vraiment possible de montrer qu'une particule possède une taille évanescente ? Cette question sera primordiale dans les deux dernières parties de notre promenade. De la même manière, nous avons besoin de nous demander et de vérifier si les points dans l'espace existent. Notre excursion nous mènera au résultat étourdissant que toutes les réponses à ces questions sont négatives. Pouvez-vous imaginer pourquoi ? Ne soyez pas déçus si vous trouvez cette conclusion dure à avaler : de nombreux esprits brillants ont eu la même difficulté.

Défi 111 s

Cependant, beaucoup de particules, tels les électrons, les quarks ou les photons, sont considérées comme ponctuelles dans un but pratique. Une fois que nous savons comment décrire le mouvement des particules ponctuelles, nous pouvons également décrire le mouvement des corps plus volumineux, rigides ou déformables, en admettant qu'ils sont constitués de parties. C'est la même démarche que de décrire le mouvement entier d'un animal comme une combinaison du mouvement de ses différentes parties. La description la plus simple, l'*approximation du continu*, définit les corps étendus comme un assemblage infini de particules ponctuelles. Elle nous permet de comprendre et de prédire le mouvement de toutes les choses agréables, le mouvement de l'air dans les ouragans et du parfum dans une pièce. Le mouvement du feu et de tous les autres corps gazeux, le fléchissement du bambou sous le vent, le changement de forme du chewing-gum, et la croissance des plantes et des animaux peuvent être également expliqués de cette manière.

Réf. 47

Une description plus précise que celle de l'approximation du continu est donnée ci-

Cambridge University Press, 1993.

* Un *satellite* est un objet tournant autour d'une planète, comme la Lune. Un *satellite artificiel* est un système mis en orbite par l'homme, tels que les Spoutnik.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

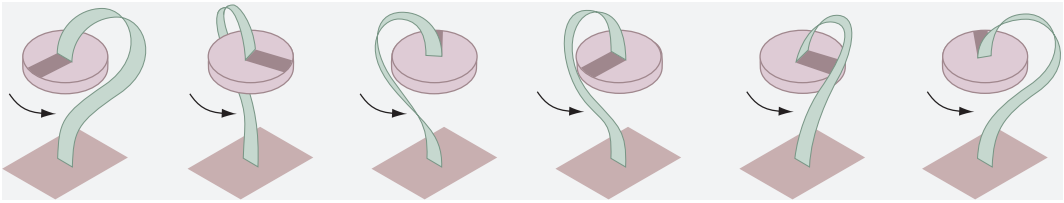


FIGURE 30 Comment un objet peut tourner continuellement sans embrouiller la liaison avec un second objet.

Page ?? dessous. Néanmoins, toutes les observations ont confirmé jusqu'à présent que le mouvement des corps volumineux peut être décrit avec une grande précision comme la conséquence du mouvement de leurs parties. Cette approche nous dirigera à travers les deux premières étapes de notre ascension montagnarde. C'est seulement à la troisième partie que nous découvrirons que cette décomposition est impossible à une échelle fondamentale.

DES JAMBES ET DES ROUES

Les membres du corps humain déterminent sa silhouette. La forme est une caractéristique importante des corps : elle nous indique, entre autres, comment les considérer. En particulier, les êtres vivants sont tous constitués d'un corps d'un seul tenant. Ce n'est pas une affirmation vide de sens : à partir de cette remarque nous pouvons déduire que les animaux ne peuvent avoir des roues ou des hélices, mais uniquement des jambes, des nageoires ou des ailes. Pourquoi ?

Les êtres vivants n'ont qu'une seule surface. Dit plus simplement, ils n'ont qu'un Appendix ?? seul morceau d'épiderme. Mathématiquement parlant, les animaux sont *connexes*. Cela Réf. 48 est souvent supposé être incontestable, et on fait régulièrement allusion au fait que lacirculation sanguine, les nerfs et les connexions lymphatiques reliées à une partie rotative s'emmêleraient. Toutefois, cet argument n'est pas si simple, comme le montre la Figure 30. Elle indique qu'il est malgré tout possible de faire tourner continuellement un corps par rapport à un second, sans emmêler les liaisons. Pouvez-vous trouver un Défi 112 s exemple de ce type de mouvement sur votre propre corps ? Êtes-vous capable de voir comment plusieurs fils peuvent être attachés au corps rotatif de la figure sans entraver la Défi 113 s rotation ?

En dépit de la possibilité pour les animaux de posséder des parties rotatives, la méthode de la Figure 30 ne peut toutefois pas être appliquée pour rendre une roue ou une Défi 114 s hélice utilisable. Pouvez-vous imaginer pourquoi ? L'évolution n'a pas eu le choix : elle a évincé les animaux possédant des parties tournant autour d'essieux. C'est la raison pour laquelle les hélices et les roues n'existent pas dans la nature. Bien sûr, cette limitation n'empêche pas les corps vivants de se déplacer de manière générale en roulant : les buis- Réf. 49 sons épineux (ceux que l'on voit dans les westerns), les graines de divers arbres, quelques insectes, certains autres animaux, les enfants et les danseurs se déplacent à l'occasion en roulant ou en tournant leur corps tout entier.

Les corps *uniques*, et donc tous les êtres vivants, ne peuvent se déplacer qu'au moyen d'une *contorsion* de leur forme : par conséquent ils sont contraints de marcher, courir, ramper ou agiter leurs ailes ou leurs nageoires, comme indiqué sur la Figure 31. Au

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 31 Les jambes et les « roues » chez les êtres vivants.

contraire, les systèmes constitués de plusieurs corps, tels que les bicyclettes, les pédalos ou autres machines, peuvent se déplacer *sans* aucun changement de forme de leurs constituants, autorisant ainsi l'usage de roues avec essieux, d'hélices ou autres appareils rotatifs*.

En résumé, à chaque fois que nous observons une construction dans laquelle une certaine partie tourne continuellement (et sans le « montage » de la figure), nous devinons immédiatement qu'il s'agit d'un artefact : c'est une machine et non pas un être vivant (mais pourtant construite par lui). Cependant, comme tant de déclarations concernant les créatures vivantes, la nature possède également des exceptions. La distinction entre un et deux corps est beaucoup moins claire si le système tout entier est constitué de quelques molécules, ce qui se produit clairement dans les bactéries. Des organismes tels que *Escherichia coli*, la bactérie bien connue hôte de l'intestin humain, ou les bactéries issues de la famille *Salmonella* nagent toutes en utilisant des flagelles. Les *flagelles* sont des filaments minces, du même acabit que les fins poils qui émergent de la membrane cellulaire. Il fut montré dans les années 1970 que chaque flagelle, constitué d'une ou plusieurs molécules allongées d'un diamètre de quelques dizaines de nanomètres, tourne

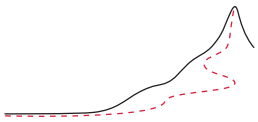
* Malgré l'inconvénient de ne pas pouvoir utiliser des parties rotatives et d'être réduites à un seul morceau, les constructions mobiles de la nature, généralement appelées des animaux, surpassent fréquemment les machines construites par l'homme. Par exemple, comparez la taille des plus petits systèmes volants bâtis par l'évolution à ceux construits par les hommes. (Consultez par exemple http://pixelito.reference.be.) Il y a deux explications à cet écart. Premièrement, les systèmes naturels ont incorporé des dispositifs de réparation et d'entretien. Deuxièmement, la nature peut bâtir de vastes structures à l'intérieur de contenants dotés d'ouvertures réduites. En fait, la nature est très astucieuse, à l'image de ce que les gens font lorsqu'ils construisent des voiliers à l'intérieur de bouteilles en verre. Le corps humain est plein d'exemples analogues, pouvez-vous en citer quelques-uns ? Défi 115 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Page ?? en réalité autour de son axe. Une bactérie est capable de faire tourner ses flagelles à la fois dans le sens horaire et antihoraire, elle peut réaliser plus de 1 000 rotations par seconde, et peut faire tourner tous ses flagelles en parfaite synchronisation. (Ces roues sont si minuscules qu'elles n'exigent pas de connexion mécanique.) Par conséquent les roues existent effectivement chez les êtres vivants, bien qu'elles soient très petites. Mais continuons dorénavant avec notre étude des objets ordinaires.

Réf. 50

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 4

DES OBJETS ET DES IMAGES À LA CONSERVATION

En marchant à travers une forêt nous remarquons deux formes assez distinctes de mouvement : la brise déplace les feuilles et, en même temps, leurs ombres bougent sur le
Réf. 51 sol. Les ombres sont une forme élémentaire d'image. Les objets et les images sont tous les deux capables de bouger. Les tigres qui s'élancent, les flocons de neige qui chutent et la matière recrachée par les volcans sont des exemples de mouvement, puisqu'ils changent tous de position au cours du temps. Pour la même raison, l'ombre qui suit notre corps, le rayon de lumière qui tourne autour de la tour d'un phare durant une nuit brumeuse, et l'arc-en-ciel qui conserve constamment la même distance apparente pour un randonneur sont des exemples de mouvement.

Toute personne qui a déjà visionné un dessin animé sait que les images peuvent bouger de façon plus surprenante que les objets. Les images peuvent modifier leur taille, leur forme et même leur couleur, une prouesse qu'un nombre restreint d'objets est capable de réaliser*. Les images peuvent apparaître et disparaître sans laisser de traces, se multiplier, s'interpénétrer, aller en arrière dans le temps et braver la gravité ou toute autre force. Les images, et même les ombres ordinaires, peuvent se déplacer plus vite que la lumière. Les images peuvent flotter dans l'espace et conserver la même distance par rap-
Réf. 53 port aux objets qui s'approchent. Les objets ne peuvent presque rien faire de tout cela. En général, les « lois de la physique des dessins animés » sont assez différentes de celles de la nature. En réalité, le mouvement des images ne semble pas suivre une quelconque règle, par opposition au mouvement des objets. D'un autre côté, les objets et les images se différencient de leur environnement par le fait qu'ils possèdent tous les deux des *frontières* qui définissent leur taille et leur forme. Nous sentons la nécessité d'avoir des critères précis permettant de discerner ces deux cas.

Le fait de procéder à une distinction claire et nette entre les images et les objets est exécuté de la même façon lorsque les enfants ou les animaux se trouvent face à un miroir

* Hormis les changements très lents tels que le changement de couleur des feuilles en automne, seuls certains cristaux, la pieuvre, le caméléon et quelques autres espèces animales réalisent cela dans la nature. Parmi les objets construits par l'homme, la télévision, les écrans d'ordinateurs, les appareils chauffants et certains la-
Défi 116 s sers peuvent également le faire. Connaissez-vous d'autres exemples ? Le livre de K. Nassau, *The Physics and Chemistry of Colour – the fifteen causes of colour*, J. Wiley & Sons, 1983, est une excellente source d'informations sur le thème des couleurs. Dans le domaine des sciences populaires, le livre le plus admirable est le travail exemplaire de l'astronome flamand Marcel G. J. Minnaert, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, une version revue et corrigée de sa splendide série de livres *De natuurkunde van 't vrije veld*,
Réf. 52 Thieme & Cie, Zutphen. Tous les scientifiques qui étudient la nature doivent lire ce livre. Sur le Web, voyez aussi le site, plus succinct, http://webexhibits.org/causesofcolour.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

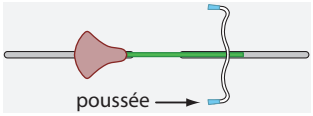


FIGURE 32 Dans quelle direction la bicyclette tourne-t-elle ?

pour la première fois : ils essaient de *toucher* ce qu'ils voient. En fait, si nous sommes capables de toucher ce que nous voyons – ou, plus précisément, si nous sommes capables de le déplacer – nous l'appelons un *objet*, sinon c'est une *image**. Les images ne peuvent pas
Page ??
être palpées, alors que les objets peuvent l'être. Les images ne peuvent se heurter l'une l'autre, alors que les objets le peuvent. Et comme chacun le sait, toucher quelque chose permet d'appréhender sa résistance au mouvement. Certains corps, tels que les papillons, opposent une faible résistance et sont facilement déplacés, d'autres, tels que les bateaux, résistent beaucoup plus, et sont déplacés avec beaucoup de peine. Cette opposition au mouvement – ou plus exactement à la variation du mouvement – est appelée l'*inertie*, et la difficulté avec laquelle un corps peut être déplacé est appelée sa *masse (inertielle)*. Les images ne possèdent ni inertie ni masse.

En conclusion, pour la description du mouvement, nous devons distinguer les corps, qui peuvent être palpés et qui sont impénétrables, des images, qui ne le peuvent et qui ne le sont pas. Toute chose visible est soit un objet, soit une image. Il n'y a pas de tierce
Défi 117 s
possibilité. (Êtes-vous d'accord ?) Dans le cas où l'objet est si lointain qu'il ne peut être touché, comme une étoile ou une comète, il peut être ardu de convenir si celui-ci est associé à une image ou à un objet. Nous rencontrerons à plusieurs reprises cette question épineuse. Par exemple, comment montreriez-vous que les comètes sont des objets et non
Défi 118 s
des images ?

De la même manière que les objets sont constitués de *matière*, les images sont constituées de *rayonnement*. Les images font partie du royaume du théâtre d'ombres, du ci-
Réf. 54
néma, de la télévision, du graphisme numérique, des organisations croyantes et du domaine des spécialistes en substances hallucinogènes. Les photographies, les films cinématographiques, les fantômes, les anges, les rêves et de nombreuses hallucinations sont des images (parfois provoquées par un dysfonctionnement psychique). Pour comprendre les images, nous avons besoin d'étudier le rayonnement (et également l'œil et le cerveau). Malgré cela, en raison de l'importance des objets – après tout, nous sommes nous-mêmes des objets – nous allons d'abord étudier ceux-ci.

Mouvement et contact

> « Démocrite soutient qu'il n'existe qu'une seule espèce de mouvement : celui qui résulte de la collision. »
>
> Aetius, *Opinions*.
Réf. 55

Lorsqu'un enfant monte sur un vélo à une roue, il ou elle tire profit d'une loi fondamentale dans notre univers : un corps agissant sur un autre le met en mouvement. En

* Nous pourrions suggérer d'y ajouter la nécessité que nous puissions faire tourner les objets sur eux-mêmes. Toutefois, cette exigence pose des problèmes dans le cas des atomes, tel qu'expliqué à la page **??**, et des particules élémentaires, ainsi la rotation ne constitue pas une nécessité supplémentaire.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

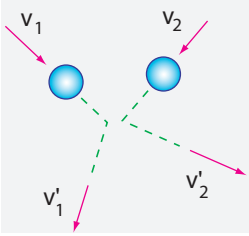


FIGURE 33 Les collisions déterminent la masse.

FIGURE 34 Le kilogramme standard. (© BIPM)

fait, en à peu près six heures, n'importe qui peut apprendre à monter sur un monocycle et s'amuser avec. Comme dans tous les divertissements de la vie, tel que s'amuser avec des jouets, des animaux, des femmes ou des hommes, des appareils, des enfants, la mer, le vent, aller au cinéma, jongler, faire une randonnée et faire l'amour, quelque chose exerce une action sur autre chose. Donc notre premier défi est de décrire ce transfert de mouvement de manière plus approfondie.

Le contact n'est pas la seule manière de mettre en mouvement quelque chose : une pomme qui tombe d'un arbre ou un aimant qui en attire un autre en sont des contre-exemples. Les influences à distance sont plus fascinantes : il n'y a rien de dissimulé, et cependant quelque chose d'obscur se produit. Le mouvement par contact semble plus facile à appréhender, et c'est pourquoi nous commençons généralement par celui-ci. Cependant, en dépit de ce parti pris, les forces sans contact ne peuvent pas être esquivées. En choisissant cette option nous nous représentons l'expérience commune de tous les cyclistes (voir la Figure 32). Si vous roulez à vélo à une vitesse suffisamment élevée et que vous tentez de tourner à gauche en poussant la poignée droite du guidon, vous tournerez à *droite*[*]. En d'autres termes, malgré notre choix, le restant de notre promenade nous amènera rapidement à étudier également les interactions à distance.

Qu'est-ce que la masse ?

> « Δός μοι ποῦ στω καὶ κινῶ τὴν γῆν.
> Da ubi consistam, et terram movebo[**]. »
>
> Archimède

* Cet effet impressionnant ne fonctionne évidemment qu'au-dessus d'une certaine vitesse minimale. Pouvez-vous déterminer quelle est cette vitesse ? Soyez prudents ! Une poussée trop forte vous fera chuter.

Défi 119 s

** « Donnez-moi un point fixe et un levier et je soulèverai la Terre. » Archimède (v. 283–212), scientifique et ingénieur grec. Cette citation lui fut attribuée par Pappus d'Alexandrie. Déjà, Archimède avait connaissance du fait que la distinction utilisée par les juristes entre propriété mobile et immobile n'avait aucun sens.

Réf. 56

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

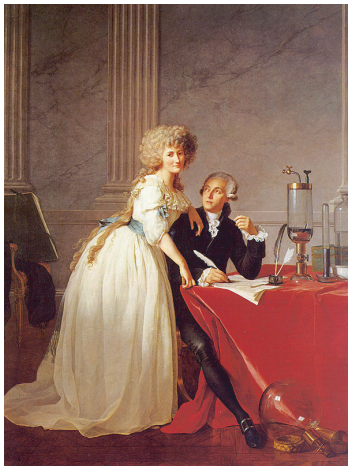


FIGURE 35 Antoine Laurent de Lavoisier.

Lorsque nous repoussons quelque chose, c'est parce que nous ne sommes pas familiers avec cette chose. De la même façon, lorsque nous donnons un coup de pied dans un objet dans la rue, nous prêtons immédiatement attention à la même notion que les enfants explorent quand, pour la première fois, ils se trouvent face à un miroir ou qu'ils aperçoivent un point rouge dessiné par un laser. Nous vérifions si cette entité inconnue peut être poussée et nous notons comment cet objet non identifié réagit à notre influence. Une version de haute précision de cette expérience est donnée dans la Figure 33. En répétant ce procédé avec divers couples d'objets, nous découvrons – comme dans la vie quotidienne – qu'une certaine quantité fixe m_i peut être assignée à chaque objet i. Plus l'objet est difficile à déplacer, plus cette quantité est grande ; elle est déterminée par la relation

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} \tag{13}$$

où Δv représente la variation de vitesse produite par la collision. Le nombre m_i est appelé *masse* de l'objet i.

Dans le but de manipuler des valeurs de masses qui soient communes à tout le monde, la valeur de la masse pour un objet sélectionné en particulier doit être fixée au préalable. Cet objet spécifique, montré sur la Figure 34 est appelé le *kilogramme standard* et est conservé avec beaucoup de soin dans un récipient en verre sous vide à Sèvres, à proximité de Paris. Il n'est utilisé que très occasionnellement afin que la poussière, l'humidité ou les égratignures ne risquent pas de modifier sa masse. C'est grâce au kilogramme standard que nous pouvons estimer la valeur de la masse de chaque objet dans le monde.

La masse quantifie ainsi la difficulté à faire bouger quelque chose. Les masses élevées sont plus dures à déplacer que les masses plus petites. Manifestement, seuls les objets sont dotés d'une masse, les images n'en ont pas. (Par ailleurs, le mot « masse » est dérivé, via le latin, du mot grec μαζα – pain – ou de l'hébreu « mazza » – pain sans levain – de signification complètement différente.)

Réf. 45

Les expériences avec les objets quotidiens ont également montré que, à tout moment

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 36 Christiaan Huygens.

dans n'importe quelle collision, la somme de toutes les masses en jeu est conservée :

$$\sum_i m_i = \text{const} . \tag{14}$$

Le premier à avoir formulé la loi de conservation de la masse fut Antoine Laurent de Lavoisier*. La conservation de la masse implique que la masse d'un système composé soit égale à la somme des masses des constituants. En résumé, *la masse galiléenne est une mesure de la quantité de matière*.

Ainsi, la définition de la masse peut être formulée d'une autre manière. Nous pouvons attribuer un nombre m_i à chaque objet i de telle façon que, pour des collisions libres de toute influence extérieure, la somme suivante reste invariante *pendant* la collision :

$$\sum_i m_i \mathbf{v_i} = \text{const} . \tag{15}$$

Le produit de la vitesse $\mathbf{v_i}$ par la masse m_i est nommé la *quantité de mouvement*** du corps. La somme, ou *quantité de mouvement totale* du système, reste identique avant et après la collision : c'est une quantité *conservée*. *La conservation de la quantité de mouvement définit la masse*. Les deux lois de conservation (14) et (15) furent exprimées de cette manière pour la première fois par le grand physicien hollandais Christiaan Huygens***.

* Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794), chimiste français et homme de talent. Lavoisier fut le premier à comprendre que la combustion est une réaction qui se produit en présence d'oxygène. Il découvrit les constituants de l'eau et introduisit des méthodes de mesure de masse en chimie. Lorsqu'il fut (injustement) condamné à la guillotine lors de la Révolution française, il se résigna à réaliser une expérience pour la recherche scientifique : il décida de cligner des paupières aussi longtemps que possible après que sa tête fut tranchée, afin de dévoiler aux autres combien de temps la perte de conscience met à survenir. Lavoisier parvint à cligner onze fois des yeux.

** Le terme anglais est *momentum*, et parfois on emploie en français le terme *moment* (d'une force). La quantité de mouvement ne doit pas être confondue avec l'*impulsion* (en anglais *impulse*), cette dernière étant l'intégrale de la force en fonction de la durée. Par abus de langage, nous parlerons dans les sections sur la relativité du « tenseur énergie–impulsion » alors qu'en toute rigueur nous devrions dire « tenseur énergie–quantité de mouvement » [N.D.T.].

*** Christiaan Huygens (n. La Haye 1629, d. Hofwijck 1695) fut un des principaux physiciens et mathématiciens de son époque. Huygens élucida les concepts de base de la mécanique, il fut également un des premiers à montrer que la lumière est une onde. Il rédigea des ouvrages prépondérants sur la théorie des probabilités, les mécanismes horlogers, l'optique et l'astronomie. Parmi ses nombreuses découvertes, Huygens s'évertua à montrer que la nébuleuse d'Orion est constituée d'étoiles, il découvrit Titan, une lune de Saturne (la seule

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

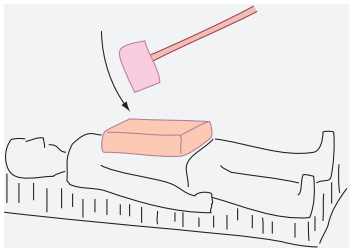


FIGURE 37 Est-ce dangereux ?

TABLEAU 12 Quelques valeurs mesurées de quantités de mouvement.

OBSERVATION	QUANTITÉ DE MOUVEMENT
Quantité de mouvement d'un photon de couleur verte	$2 \cdot 10^{-28}$ Ns
Quantité de mouvement moyenne d'une molécule d'oxygène dans l'air	10^{-26} Ns
Quantité de mouvement d'un photon de rayon X	10^{-23} Ns
Quantité de mouvement d'un photon γ	10^{-17} Ns
La plus grande quantité de mouvement d'une particule dans les accélérateurs	1 fNs
Quantité de mouvement de Planck	6,5 Ns
Boule de billard élancée	3 Ns
Balle de pistolet au vol	10 Ns
Coup de poing	de 15 à 50 Ns
Homme marchant tranquillement	80 Ns
Véhicule sur autoroute	40 kNs
Impact d'une météorite de 2 km de diamètre	100 TNs
Quantité de mouvement d'une galaxie dans une collision galactique	jusqu'à 10^{46} Ns

Quelques valeurs caractéristiques de quantités de mouvement sont données dans le Tableau 12.

La conservation de la quantité de mouvement sous-tend implicitement que, lorsqu'une boule en mouvement heurte une autre boule au repos et de même masse, une formule simple permet de déterminer l'angle entre les directions que les boules empruntent après la collision. Pouvez-vous trouver cette formule ? Elle est particulièrement utile lorsque nous jouons au billard. Nous nous apercevrons plus tard qu'elle n'est *pas* valide en relativité restreinte.

Défi 120 s

Une autre conséquence est indiquée sur la Figure 37 : un homme est allongé sur une planche à clous avec deux gros blocs de béton posés sur son abdomen. Un autre homme frappe les blocs à l'aide d'une lourde masse. L'homme allongé ne ressent aucune douleur puisque le choc est principalement absorbé par le béton – à moins qu'il soit retiré.

visible à l'époque [N.D.T.]), et montra que les anneaux de Saturne sont composés de rochers. (Cela paraît contradictoire avec Saturne lui-même, dont la masse volumique est inférieure à celle de l'eau.)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 121 s Pourquoi ?

La définition précédente de la masse a été généralisée par le physicien et philosophe Ernst Mach* de façon à ce qu'elle reste valide même si les deux objets interagissent à distance, et aussi longtemps que dure cette interaction le long de la ligne joignant leurs positions. Le rapport des masses de deux corps est défini comme étant l'opposé du rapport inverse des accélérations respectives, ainsi donc

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{a_1}{a_2} \,, \tag{16}$$

où a est l'accélération de chaque corps pendant l'interaction. Cette définition a été examinée en détail par la communauté des physiciens, principalement durant le dix-neuvième siècle. Quelques remarques résument ces résultats :

— La définition de la masse *implique* la conservation de la quantité de mouvement $\sum mv$. La conservation de la quantité de mouvement n'est *pas* une loi distincte. Elle ne peut pas être vérifiée expérimentalement, puisque la masse est définie de telle manière que ce principe puisse être formulé.
— La définition de la masse *implique* l'égalité entre les produits m_1a_1 et $-m_2a_2$. De tels produits sont appelés des *forces*. L'égalité entre les forces d'action et de réaction n'est pas un principe à part : la masse est définie de telle manière que ce principe puisse être formulé.
— La définition de la masse est *indépendante* du fait qu'un contact est établi ou non, et du fait que les accélérations sont dues à l'électricité, à la gravitation ou à toute autre interaction**. Puisqu'une interaction n'entre pas dans la définition de la masse, les valeurs de masses définies à partir de l'interaction électrique, nucléaire ou gravitationnelle sont toutes équivalentes tant que la quantité de mouvement est conservée. Toutes les interactions connues conservent la quantité de mouvement. Pour certaines raisons historiques malheureuses, la valeur de la masse mesurée avec les interactions électrique et nucléaire est appelée masse « inertielle » et la masse mesurée en utilisant la gravité est appelée masse « gravitationnelle ». Comme cela apparaîtra plus loin, cette distinction artificielle ne possède aucune signification intrinsèque. Cela deviendra particulièrement clair lorsque nous prendrons du recul par rapport aux corps en question.
— La définition de la masse est valide uniquement pour des observateurs au repos ou en

* Ernst Mach (Chirlitz–Turas 1838-Haar 1916), physicien et philosophe autrichien. Le *mach*, unité de mesure pour la vitesse des avions, défini comme étant un multiple de la vitesse du son dans l'air (environ 0,3 km/s), est nommé en son honneur. Il développa l'interféromètre de Mach-Zehnder, il étudia également les fondements de la mécanique. Ses réflexions concernant la masse et l'inertie ont influencé la construction de la relativité générale, et aboutirent au principe de Mach, qui apparaîtra un peu plus loin. Il fut également le dernier scientifique à renier orgueilleusement – avec humour, et contre toute évidence – l'existence des atomes.

** Tel qu'indiqué ci-dessus, seules les forces *centrales* vérifient la relation (16) utilisée pour définir la masse. Les forces centrales agissent entre les centres de masse des corps. Nous en donnerons une définition plus
Page 88 précise plus tard. Cependant, puisque toutes les forces fondamentales sont qualifiées de centrales, ceci n'est pas une contrainte. Il ne semble y avoir qu'une seule exception notable : le magnétisme. La définition de la
Défi 122 s masse est-elle toujours valide dans ce cas ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 13 Quelques valeurs de masse mesurées.

Observation	Masse
Augmentation de masse due à l'absorption d'un photon de couleur verte	$3{,}7 \cdot 10^{-36}$ kg
L'électron : le plus léger objet connu	$9{,}109\,381\,88(72) \cdot 10^{-31}$ kg
Un atome d'argon	$39{,}962\,383\,123(3)$ u = $66{,}359\,1(1)$ yg
Le plus léger objet jamais pesé (une particule d'or)	0,39 ag
L'homme à son âge le plus précoce (l'ovule fécondé)	10^{-8} g
L'eau adsorbée sur un poids en métal de 1 kilogramme	10^{-5} g
Masse de Planck	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$ g
Empreinte digitale	10^{-4} g
Fourmi ordinaire	10^{-4} g
Gouttelette d'eau	1 mg
Abeille à miel	0,1 g
Êtres vivants les plus lourds, tels que le champignon *Armillaria ostoyae* ou un énorme séquoia *Sequoiadendron giganteum*	10^{6} kg
Le plus grand navire au long cours	$400 \cdot 10^{6}$ kg
Le plus grand objet manipulé par l'homme (une énorme plate-forme de production de gaz)	$687{,}5 \cdot 10^{6}$ kg
Le plus grand iceberg dérivant depuis l'Antarctique	10^{15} kg
L'eau sur Terre	10^{21} kg
Masse du Soleil	$2{,}0 \cdot 10^{30}$ kg
Masse de notre Galaxie	10^{41} kg
Masse totale visible dans l'univers	10^{54} kg

mouvement inertiel (à vitesse constante [N.D.T.]). Nous reviendrons là-dessus plus tard.

En mesurant la masse des corps qui nous entourent, dont une liste est donnée dans le Tableau 13, nous pouvons explorer l'art et la science de l'expérimentation. Nous découvrons aussi les propriétés fondamentales de la masse. Elle est *additive* dans la vie quotidienne, de telle sorte que la masse de deux corps assemblés est égale à la somme de leur masse respective. En outre, la masse est *continue* : elle peut apparemment prendre toutes les valeurs positives. Au final, la masse est *conservée* : la masse d'un système, définie comme étant la somme des masses de ses constituants, ne varie pas au cours du temps si le système est isolé du reste de l'univers. La masse n'est pas conservée seulement lors de collisions mais également durant la fusion, l'évaporation, la digestion et tout autre processus de transformation.

Nous verrons plus tard que dans le cas précis de la masse toutes ces propriétés, résumées dans le Tableau 14, ne sont qu'approximatives. Des expériences précises nous dévoilent qu'aucune de celles-ci n'est exacte*. Pour l'instant nous continuons avec notre

* En particulier, afin de définir la masse nous devons être capables de *différencier* les corps. Cela semble être

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 14 Propriétés de la masse galiléenne.

LES MASSES	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉSIGNATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Peuvent être différenciées	distinction	élément d'un ensemble	Page ??
Peuvent être ordonnées	succession	ordre	Page ??
Peuvent être comparées	mesurable	métrique	Page ??
Peuvent varier graduellement	continuité	complétude	Page ??
Peuvent être additionnées	quantité de matière	additivité	Page 64
Dépassent toute limite	infini	infinitude, ouverture	Page ??
Ne changent pas	conservation	invariance	m = const
Ne disparaît pas	impénétrabilité	positivité	$m \geqslant 0$

conception actuelle, la masse galiléenne, comme si nous n'avions rien de mieux à nous mettre sous la dent.

Dans une expérience célèbre au cours du seizième siècle, Santorre Santario (Santorio Santorio ou Sanctorius de Padoue) (1561–1636), un ami de Galilée, vécut durant plusieurs semaines avec toute sa nourriture et son breuvage, mais aussi ses toilettes, sur une vaste balance. Il projetait de tester la conservation de la masse. Comment le poids mesuré a-t-il
Défi 123 s varié avec le temps ?

La définition de la masse à travers la conservation de la quantité de mouvement signifie que, lorsqu'un objet tombe, la Terre est un tout petit peu plus accélérée. Si nous pouvions mesurer cette minuscule grandeur, nous pourrions déterminer la masse de la Terre. Malheureusement, cette mesure est impossible à réaliser. Pouvez-vous découvrir
Défi 124 s une meilleure façon de déterminer la masse de la Terre ?

Comme le Tableau 14 le récapitule, la masse d'un corps est décrite avec plus de précision par un nombre réel *positif*, généralement noté m ou M. C'est une conséquence directe de l'impénétrabilité de la matière. Certes, une masse (inertielle) *négative* pourrait vouloir dire qu'un tel corps se déplacerait dans la direction opposée de n'importe quelle force ou accélération appliquée sur celui-ci. Un tel corps ne pourrait être conservé dans une boîte : il chercherait à tout prix à se frayer un chemin à travers n'importe quelle paroi qui tenterait de l'arrêter. Assez étrangement, les corps de masse négative chuteraient toujours vers le bas dans le champ d'une vaste masse positive (bien que plus lentement
Défi 125 e qu'une masse équivalente positive). Êtes-vous capable d'entériner ce fait ? Par contre, un objet ayant une minuscule masse positive flotterait à une grande distance d'un corps volumineux de masse négative, comme vous pouvez facilement le deviner en comparant les diverses accélérations mises en jeu. Une masse positive et une masse négative de même valeur (absolue) demeureront à distance constante et accéléreront spontanément dans
Défi 126 e des directions opposées le long de la ligne joignant les deux masses. Remarquez qu'à la fois l'énergie et la quantité de mouvement restent conservées dans tous ces scénarios*.

un prérequis enfantin, mais nous découvrirons que ce n'est pas toujours possible dans la nature.

* Pour les curieux, lisez R. H. PRICE, Negative mass can be positively amusing, *American Journal of Physics* **61**, pp. 216–217, 1993. Des particules de masse négative enfermées dans une boîte échaufferaient cette boîte de masse positive au moment où elles traverseraient ses parois, et accéléreraient, c'est-à-dire perdraient de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

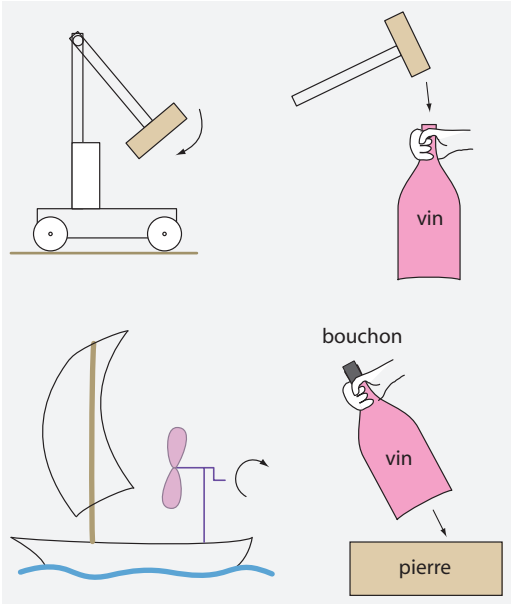


FIGURE 38 Que va-t-il se passer ?

Les corps de masse négative n'ont jamais été observés. L'antimatière, dont nous discute-
Page 62, page ?? rons bientôt, possède également une masse positive.

Le mouvement est-il éternel ?

> « Chaque corps persiste dans son état de repos ou de mouvement uniforme le long d'une ligne droite sauf s'il ne le peut plus. »
>
> Arthur Eddington*

Le produit $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ de la masse d'une particule par sa vitesse est appelé sa *quantité de mouvement*. Elle représente la tendance d'un objet à persister dans son mouvement lors d'une collision. Plus cette valeur est grande, plus il est difficile d'immobiliser l'objet. Comme le vecteur vitesse, la quantité de mouvement possède une direction et une grandeur : c'est également un vecteur. En français l'expression « quantité de mouvement » est plus adéquate que l'anglais « momentum ». Dans l'ancien temps, le mot « mouvement » était utilisé à la place de « quantité de mouvement », par exemple par Newton. La conservation de la quantité de mouvement, dans la relation (15), explicite par conséquent la conservation du mouvement pendant les interactions.

La quantité de mouvement et l'énergie sont des *quantités extensibles*. Cela signifie que nous pouvons dire pour chacune d'elles qu'elles s'*écoulent* d'un corps vers un autre, et

Page 81
Défi 127 e
l'énergie, en même temps. Elles nous permettraient de concevoir un *mouvement perpétuel* de seconde espèce, c'est-à-dire un dispositif qui contournerait le second principe de la thermodynamique. De plus, un tel système n'aurait pas d'équilibre thermodynamique, parce que son énergie peut diminuer indéfiniment. Plus nous réfléchissons aux masses négatives, plus nous sommes confrontés à des propriétés étranges qui contre-
Défi 128 s
disent les observations. D'ailleurs, quelle est la gamme des valeurs de masse possibles pour des tachyons ?

* Arthur Eddington (1882–1944), astrophysicien britannique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

qu'elles peuvent s'*accumuler* dans les corps, de la même façon que l'eau coule et peut s'accumuler dans des récipients. Imaginer la quantité de mouvement comme quelque chose qui peut être *échangé* entre des corps en collision reste intuitif lorsque nous réfléchissons à la description des objets en mouvement.

La quantité de mouvement est conservée. Cela explique les difficultés que vous pourriez éprouver si vous étiez sur une surface parfaitement lisse, telle que la glace ou le marbre poli couvert d'huile : vous ne pouvez pas avancer même en vous tapotant le dos. (Avez-vous déjà tenté de placer un chat sur une telle surface marbrée ? Il n'est même pas capable de se tenir sur ses quatre pattes. Pas plus que nous-mêmes. Pouvez-vous deviner
Défi 129 s pourquoi ?) La conservation de la quantité de mouvement permet aussi de résoudre les casse-tête de la Figure 38.

La conservation de la masse et de la quantité de mouvement signifie aussi que la téléportation (« beam me up »*) est impossible dans la nature. Pouvez-vous expliquer cela à
Défi 130 s un néophyte ?

La conservation de la quantité de mouvement implique que la quantité de mouvement peut être assimilée à un fluide invisible. Dans une interaction, ce fluide invisible est transmis d'un objet à l'autre. Cependant, la quantité totale reste constante.

La conservation de la quantité de mouvement suggère également que le mouvement ne cesse jamais : il est simplement *échangé*. D'un autre côté, le mouvement « disparaît » régulièrement dans notre entourage, comme dans le cas d'un caillou qu'on laisse tomber sur le sol, ou d'une balle que l'on abandonne sur l'herbe. Qui plus est, dans notre vie de tous les jours, nous observons fréquemment de la création de mouvement, comme à chaque fois que nous ouvrons la main. Comment ces exemples s'ajustent-ils à la conservation de la quantité de mouvement ?

Il apparaît que la réponse se trouve dans les aspects microscopiques de ces systèmes. Un muscle *transforme* simplement un certain type de mouvement, à savoir celui des électrons situés dans certains composés chimiques**, en un autre, le mouvement des doigts. Le travail exercé par les muscles est analogue à celui d'un moteur à explosion qui transpose le mouvement des électrons contenus dans le carburant dans le mouvement des roues. Tous les deux exigent un carburant et s'échauffent durant le processus.

Nous devons également analyser le comportement microscopique d'une balle qui roule sur l'herbe jusqu'à ce qu'elle s'immobilise. La disparition du mouvement est appelée *frottement*. En étudiant cette situation attentivement, nous comprenons que l'herbe et la balle se réchauffent un petit peu pendant le processus. Pendant le frottement, le mouvement visible est transformé en chaleur. Plus tard, lorsque nous découvrirons la structure de la matière, il deviendra clair que la chaleur se manifeste par le mouvement désordonné des constituants microscopiques de chaque matériau. Lorsque ces constituants se déplacent tous dans la même direction, généralement l'objet tout entier se déplace. Lorsqu'ils fluctuent de manière aléatoire, l'objet reste au repos mais se réchauffe. La chaleur est une forme de mouvement. Ainsi le frottement semble n'être que disparition du mouvement, en réalité il est une transformation d'un mouvement ordonné en mouvement désordonné.

* Expression empruntée à la célèbre série télévisée Star Trek : « Beam me up Scotty ! », qui signifie littéralement « Téléporte-moi Scotty ! » [N.D.T.].

Réf. 57 ** Généralement l'adénosine triphosphate (ATP), le carburant de la plupart des processus chez les animaux.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Malgré la conservation de la quantité de mouvement, le mouvement perpétuel *macroscopique* n'existe pas, puisque le frottement ne peut pas être complètement supprimé*. Le mouvement est éternel seulement à un ordre de grandeur microscopique. En d'autres termes, la disparition et également l'apparition spontanée du mouvement dans notre vie quotidienne sont une illusion due aux limitations de nos facultés sensorielles. Par exemple, le mouvement attribué à chaque être vivant existe avant sa naissance, et est toujours là après sa mort. La même chose se produit avec son énergie. Ce résultat est probablement le plus impénétrable que nous puissions avoir sur l'idée de l'éternité, à partir des preuves collectées par l'observation. Ce n'est peut-être pas une coïncidence si l'énergie fut dénommée *vis viva*, ou « force vive », par Leibniz et d'autres penseurs de son époque.

Puisque le mouvement est conservé, il n'a pas d'origine. Donc, à ce point de notre promenade, nous ne pouvons pas répondre aux questions fondamentales : Pourquoi le mouvement existe-t-il ? Quelle est son origine ? Le bout du tunnel est encore loin.

Appendice sur la conservation – l'énergie

Lorsqu'on examine des collisions avec soin, une deuxième quantité conservée se dévoile. Les expériences montrent que, dans le cas des collisions parfaites ou élastiques – des collisions sans frottement –, la quantité suivante, appelée *énergie cinétique* T du système, est également conservée :

$$T = \sum_i \tfrac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^2 = \sum_i \tfrac{1}{2} m_i v_i^2 = \text{const} \,. \tag{17}$$

L'énergie cinétique d'un corps dépend donc de sa masse et du carré de sa vitesse v. L'énergie cinétique est le potentiel que possède un corps pour provoquer des changements dans les corps qu'il heurte. La désignation finale « énergie cinétique » fut introduite par Gustave-Gaspard Coriolis**. Coriolis introduisit également le facteur 1/2, de

* Quelques exemples drôles des tentatives passées pour construire une *machine à mouvement perpétuel* sont narrés dans Stanislav Michel, *Perpetuum mobile*, VDI Verlag, 1976. De façon intéressante, l'idée de mouvement éternel chemina de l'Inde jusqu'en Europe à travers le monde islamique, vers les années 1200, et devint populaire puisqu'elle s'opposait à l'opinion courante de cette époque que tout mouvement sur Terre disparaît avec le temps. Consultez également les sites Web http://www.geocities.com/mercutio78_99/pmm.html et http://www.lhup.edu/~dsimanek/museum/unwork.htm. L'erreur conceptuelle faite par les âmes excentriques et employée par les esprits tordus est toujours la même : l'espoir de pouvoir surpasser le frottement. (Certes, ceci n'est vrai que pour le mouvement perpétuel de seconde espèce, celui du premier type – qui est encore plus en contradiction avec l'observation – tente même de générer de l'énergie à partir de rien.)

Si la machine est bien conçue, c'est-à-dire avec peu de frottements, alors elle peut prélever le peu d'énergie dont elle a besoin pour la subsistance de son mouvement dans des effets environnementaux subtils. Par exemple, au Victoria and Albert Museum à Londres nous pouvons admirer une magnifique horloge action-
Réf. 58 née par les variations de la pression de l'air au cours du temps.

Un faible frottement signifie que le mouvement prend beaucoup de temps avant de s'arrêter. Nous pensons *illico presto* au mouvement des planètes. En réalité, il *existe* des frottements entre la Terre et le Soleil.
Défi 131 s (Pouvez-vous en déterminer un des mécanismes ?) Mais sa valeur est si faible que la Terre a déjà tourné autour du Soleil pendant des milliers de millions d'années et continuera d'en faire autant pendant plus longtemps encore.

** Gustave-Gaspard Coriolis (n. Paris 1792, d. Paris 1843), ingénieur et mathématicien français.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 39 Robert Mayer.

Défi 132 s telle sorte que la relation $dT/dv = p$ soit toujours vérifiée. (Pourquoi ?) Le mot énergie est emprunté au grec ancien ; au départ il était utilisé pour décrire le caractère, la détermination et signifiait « vigueur intellectuelle ou morale ». Il fut introduit en physique par Thomas Young (1773–1829) en 1807 parce que sa traduction littérale est « la force intérieure ». (Les lettres E, W, A et plusieurs autres sont utilisées pour symboliser l'énergie.) Une autre définition équivalente de l'énergie apparaîtra plus loin : l'énergie est ce qui peut être transformé en chaleur.

L'*énergie* (physique) est la mesure de l'aptitude à produire du mouvement. Un corps possède beaucoup d'énergie s'il est capable de déplacer de nombreux autres corps. L'énergie est un nombre, elle n'a pas de direction. La quantité de mouvement totale de deux masses égales se déplaçant avec des vitesses opposées est nulle, leur énergie totale s'accroît avec leur vitesse. L'énergie mesure donc aussi le mouvement, mais d'une manière différente de la quantité de mouvement. L'énergie mesure le mouvement à un niveau plus fondamental. Voici une autre définition équivalente : l'énergie est la capacité à produire du travail. Ici, le concept physique de travail est précisément, mais de manière plus détaillée, ce que nous entendons par travail dans notre vie courante*.

Ne soyez pas surpris si vous ne saisissez pas immédiatement la différence entre la quantité de mouvement et l'énergie : les physiciens ont mis environ deux siècles pour la comprendre. Parfois ils ont même insisté pour conserver la même dénomination pour les deux, et souvent ne savaient pas vraiment quelle situation faisait appel à quel concept. Il vous est donc permis de prendre plusieurs minutes pour vous familiariser avec ces notions.

L'énergie et la quantité de mouvement quantifient toutes les deux comment un système change. La quantité de mouvement nous indique comment le système change dans l'espace, l'énergie mesure comment le système change dans le temps. La quantité de mouvement est nécessaire pour comparer des mouvements ici et là-bas. L'énergie est nécessaire pour comparer des mouvements maintenant et demain. Quelques valeurs mesurées d'énergie sont données dans le Tableau 15.

Une manière d'exprimer la différence entre l'énergie et la quantité de mouvement est de réfléchir aux problèmes suivants. Est-il plus difficile d'arrêter un homme de masse m qui court à la vitesse v, ou un homme de masse $m/2$ qui court à la vitesse $2v$, ou encore
Défi 133 e un de masse $m/2$ à la vitesse $\sqrt{2}v$? Vous pouvez demander de l'aide à un ami qui joue au rugby pour vous conforter dans votre réponse.

Une autre distinction est illustrée par l'athlétisme : le *véritable* record du monde de

* Le *travail* (physique) est le produit de la force par la distance parcourue dans la direction de cette force.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 15 Quelques valeurs mesurées d'énergie.

OBSERVATION	ÉNERGIE
Énergie cinétique moyenne d'une molécule d'oxygène de l'air	$6 \cdot 10^{-21}$ J
Énergie d'un photon de couleur verte	$5{,}6 \cdot 10^{-20}$ J
Énergie d'un photon de rayon X	10^{-15} J
Énergie d'un photon γ	10^{-12} J
L'énergie la plus élevée d'une particule dans les accélérateurs	10^{-7} J
Homme marchant tranquillement	20 J
Une flèche en plein vol	50 J
Crochet droit en boxe	50 J
Énergie d'une pile de torche électrique	1 kJ
Balle de pistolet en vol	10 kJ
Digestion d'une pomme	0,2 MJ
Véhicule sur une autoroute	1 MJ
L'énergie la plus élevée de l'impulsion d'un laser	1,8 MJ
Flash d'un éclair	jusqu'à 1 GJ
Énergie de Planck	2,0 GJ
Petite bombe nucléaire (20 ktonnes)	84 TJ
Tremblement de terre de magnitude 7	2 PJ
La plus grosse bombe nucléaire (50 Mtonnes)	210 PJ
Impact d'une météorite de 2 km de diamètre	1 EJ
Consommation annuelle d'énergie par les machines	420 EJ
Énergie de rotation de la Terre	$2 \cdot 10^{29}$ J
Explosion d'une supernova	10^{44} J
Sursaut de rayons gamma	jusqu'à 10^{47} J
Énergie contenue dans la masse du Soleil d'après $E = mc^2$	$1{,}8 \cdot 10^{47}$ J
Énergie contenue dans le trou noir central de notre Galaxie	$4 \cdot 10^{53}$ J

saut en longueur, presque 10 m, est toujours détenu par un athlète qui, au début du vingtième siècle, courut avec un poids dans chaque main et projeta les poids derrière lui au moment où il commença à sauter. Pouvez-vous expliquer cette prouesse ?

Défi 134 s

Quand un véhicule voyageant à 100 m/s fonce de front sur un véhicule immobile de même marque et de même modèle, quel véhicule encaisse les plus gros dégâts ? Qu'est-ce qui change si le véhicule à l'arrêt a ses freins serrés ?

Défi 135 s

Pour avoir une meilleure intuition de l'énergie, nous allons maintenant adopter une approche complémentaire. Pendant l'année 2000, la consommation mondiale d'énergie (provenant de diverses sources : solaire, géothermie, biomasse, éolien, nucléaire, hydraulique, gaz, pétrole, charbon, ou animale) par les machines conçues par l'homme fut d'environ 420 EJ*, pour une population mondiale d'environ 6 milliards d'individus. Pour voir ce que cette consommation d'énergie signifie, nous traduisons celle-ci en consommation individuelle de la puissance énergétique : nous obtenons à peu près 2,2 kW. Le

Réf. 59

* Pour une explication de la notation E, consultez l'Annexe B.

Page 300

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

watt W est l'unité de la puissance, et est simplement défini par la relation 1 W = 1 J/s, reflétant la définition de la *puissance (physique)* comme étant l'énergie consommée par unité de temps. De même qu'un individu au travail peut produire un travail mécanique d'environ 100 W, la consommation énergétique moyenne par individu est équivalente à environ 22 hommes travaillant pendant 24 heures de suite. (Consultez le Tableau 16 pour voir quelques valeurs de puissances relevées dans la nature.) En particulier, si nous regardons la consommation énergétique des premiers pays du monde, l'habitant moyen fait fonctionner, pour ses besoins, des machines correspondant à plusieurs centaines de « domestiques ». Pouvez-vous citer quelques-unes de ces machines ?

Défi 136 s

L'énergie cinétique n'est donc pas conservée dans la vie quotidienne. Par exemple, dans les collisions inélastiques, telles que celles de morceaux de chewing-gum s'écrasant contre un mur, l'énergie cinétique est perdue. Le *frottement* anéantit l'énergie cinétique. En même temps, le frottement engendre de la chaleur. Le fait que l'énergie *totale* soit conservée est une découverte conceptuelle fondamentale à partir du moment où elle tient compte de la révélation que la chaleur est une forme d'énergie. Le frottement est alors en réalité un processus transformant l'énergie cinétique, c'est-à-dire l'énergie associée au mouvement de l'objet, en chaleur. À l'échelle microscopique, l'énergie est conservée*. En fait, sans la conservation de l'énergie, la notion de temps ne pourrait être définie. Nous allons révéler cette correspondance sous peu.

La vitesse est-elle absolue ? – La théorie de la relativité quotidienne

Pourquoi ne ressentons-nous pas tous les mouvements de la Terre ? Les deux volets de la réponse étaient déjà connus en 1632. En premier lieu, tel que l'a illustré Galilée, nous ne ressentons pas les accélérations de la Terre parce que les effets qu'elles produisent sont si dérisoires que nos facultés sensorielles ne peuvent les détecter. En réalité, un grand nombre des accélérations citées doit causer des effets mesurables dans les expériences de haute précision, comme dans les horloges atomiques.

Page 143

Mais le deuxième point soulevé par Galilée est tout aussi important. Nous ne ressentons pas les mouvements non accélérés, translationnels, parce que c'est *en principe* impossible. Nous ne pouvons éprouver le fait que nous sommes en mouvement ! Galilée mit en scène ce sujet en comparant les remarques de deux observateurs : l'un d'entre eux est sur le plancher des vaches et l'autre est situé sur l'un des moyens de transport les plus modernes de l'époque, un navire. Galilée se demanda si un homme sur la terre et un homme dans un bateau se déplaçant à vitesse constante éprouvent (ou « ressentent ») quelque chose de différent. Einstein utilisait des observateurs dans des trains. Plus tard,

* En réalité, la conservation de l'énergie ne fut dévoilée collectivement qu'en 1842 dans toute sa généralité par Julius Robert Mayer. Il était médecin de formation, et la revue *Annalen der Physik* refusa de publier son article, car il était censé contenir des « erreurs fondamentales ». Ce que les éditeurs appelaient des erreurs étaient en fait pour la plupart – mais pas seulement – des contradictions avec leurs préjugés. Plus tard, Helmholtz, Kelvin, Joule et de nombreux autres reconnurent le génie de Mayer. Toutefois, le premier à avoir formulé la loi de la conservation de l'énergie dans sa forme actuelle fut le physicien français Sadi Carnot (1796–1832) en 1820. Pour lui ce fait était si évident qu'il ne sentit pas la nécessité de publier ce résultat. Il alla plus loin et découvrit le second « principe » de la thermodynamique. Aujourd'hui, la conservation de l'énergie, également appelée premier « principe » de la thermodynamique, est un des piliers fondamentaux de la physique, du fait qu'elle s'applique dans toutes ses branches.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 16 Quelques valeurs mesurées de puissance.

OBSERVATION	PUISSANCE
Puissance du moteur flagellaire dans une bactérie	0,1 pW
Rendement lumineux d'une ampoule à incandescence	de 1 à 5 W
Consommation électrique d'une ampoule à incandescence	de 25 à 100 W
Un homme, pendant 8 heures de travail	100 W
Un cheval, pendant de 8 heures d'effort	300 W
Eddy Merckx, le célèbre cycliste, pendant une heure	500 W
Unité officielle de puissance : le cheval-vapeur	735 W
Grosse motocyclette	100 kW
Rendement d'une station génératrice d'électricité	de 0,1 à 6 GW
Production mondiale de la puissance électrique en l'an 2000	450 GW
Puissance consommée par la géodynamo terrestre	de 200 à 500 GW
Entrée à la surface de la Terre : irradiation solaire de la Terre Réf. 60	0,17 EW
Entrée à la surface de la Terre : énergie thermique provenant de l'intérieur de la Terre	32 TW
Entrée à la surface de la Terre : puissance émise par les marées (c'est-à-dire par la rotation de la Terre)	3 TW
Entrée à la surface de la Terre : puissance générée par l'homme à partir des combustibles fossiles	de 8 à 11 TW
Perte à la surface de la Terre : puissance stockée par la photosynthèse des plantes	40 TW
Record mondial de puissance d'un laser	1 PW
Sortie de la surface de la Terre : réflexion des rayons solaires dans l'espace	0,06 EW
Sortie de la surface de la Terre : puissance rayonnée dans l'espace à 287 K	0,11 EW
Puissance émise par le Soleil	384,6 YW
Puissance maximale dans la nature, $c^5/4G$	$9{,}1 \cdot 10^{51}$ W

Défi 137 e

il devint conventionnel d'utiliser des voyageurs dans des fusées. (Qu'est-ce qui viendra au prochain coup ?) Galilée justifia que seules les vitesses *relatives* entre les objets produisent des effets, et non pas les valeurs absolues des vitesses. Pour nos sens, il n'y a aucune différence entre un mouvement constant, uniforme, aussi rapide qu'il soit, et le repos. C'est ce que nous appelons dorénavant le *principe galiléen de relativité*. Dans la vie quotidienne, nous ressentons le mouvement uniquement si le moyen de transport vibre (donc s'il accélère) ou si nous nous déplaçons contre le vent. Par conséquent, Galilée conclut que deux observateurs en mouvement uniforme en ligne droite l'un par rapport à l'autre ne peuvent dire qui se déplace « réellement ». Quelle que soit leur vitesse relative, aucun d'entre eux ne se « sent » en mouvement*.

* En 1632, dans ses *Dialogues*, Galilée écrit : « Enfermez-vous avec un de vos amis dans la cabine principale située sous le pont de quelque grand navire, et emmenez avec vous là-bas quelques mouches, papillons et

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Le repos est relatif. Ou plus clairement : le repos est une notion dépendante d'un observateur. Ce résultat de la physique galiléenne est si primordial que Poincaré introduisit l'expression « théorie de la relativité » et Einstein réexprima ce principe explicitement lorsqu'il publia sa célèbre théorie de la relativité restreinte. Cependant, ces dénominations sont maladroites. La physique galiléenne est aussi une théorie de la relativité ! La relativité du repos est commune à *toute* la physique. C'est une brique essentielle de la théorie du mouvement.

Le mouvement régulier ou uniforme n'a aucun effet observable. Seule la variation du mouvement en a un. En conséquence, chaque physicien peut conclure facilement au sujet de la formulation suivante due à Wittgenstein :

> Daß die Sonne morgen aufgehen wird, ist eine Hypothese; und das heißt : wir *wissen* nicht, ob sie aufgehen wird*.

Cette phrase est *fausse*. Pouvez-vous expliquer pourquoi Wittgenstein s'est fourvoyé ici, malgré son désir ardent de vérité ?

Défi 138 s

d'autres petits animaux volants. Prenez une vaste cuvette d'eau contenant quelques poissons, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un large récipient placé en dessous. Lorsque le navire est immobilisé, observez attentivement comment les petits animaux volent avec des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et, si vous lancez quelque chose à votre ami, vous devez le lancer plus fortement dans une direction que dans une autre, les distances étant égales : si vous sautez à pieds joints, vous traverserez des espaces égaux dans chaque direction. Après que vous aurez observé soigneusement toutes ces choses (bien qu'il ne fasse aucun doute que, lorsque le navire est au repos, tout doit se produire de cette manière), laissez le navire avancer à la vitesse que vous désirez ; aussi longtemps que le mouvement est uniforme et ne fluctue pas, vous ne découvrirez pas la moindre variation dans tous les effets identifiés, pas plus que vous ne pourrez dire à partir de n'importe lequel d'entre eux si le navire est en mouvement ou à l'arrêt. En sautant, vous enjamberez les mêmes espaces au sol qu'auparavant, sans que vous ne fassiez de sauts plus grands en direction de la poupe qu'en direction de la proue et alors même que le navire avance assez rapidement, en dépit du fait que, pendant le temps que vous êtes en l'air, le plancher en dessous de vous avancera dans la direction opposée à celle de votre saut. En lançant quelque chose à votre compagnon, vous n'aurez besoin d'aucune force supplémentaire pour l'atteindre, qu'il soit dans la direction de la tête du navire ou de la poupe, et que vous-même soyez en vis-à-vis. Les gouttelettes tomberont comme avant dans le récipient en dessous sans chuter en direction de la poupe, bien que le navire parcoure quelques intervalles de distance pendant que la goutte est en l'air. Les poissons dans leur eau ne nageront pas vers l'avant de leur cuvette avec plus d'effort que vers l'arrière, et iront avec la même facilité vers un appât disposé n'importe où sur les rebords de la cuvette. Finalement les papillons et les mouches continueront de voler indifféremment en direction de chaque côté, sans qu'il apparaisse jamais qu'ils soient concentrés en direction de la poupe, comme s'ils étaient épuisés de tenir le rythme avec la course du navire, dont ils auront été séparés durant de grands intervalles de temps en se tenant eux-mêmes dans les airs. Et si de la fumée est faite en brûlant quelque encens, elle sera vue sous la forme d'un petit nuage montant, restant immobile et ne se déplaçant pas plus vers un côté qu'un autre. Le motif de toutes ces correspondances d'effets est le fait que le mouvement du navire est pareil à toutes les choses qui sont contenues en lui, et à l'air également. C'est pourquoi je dis que vous devriez être sous le pont du navire, en cela que si ceci avait lieu au-dessus en plein air, lequel ne suivrait pas la course du navire, des différences plus ou moins perceptibles seraient aperçues dans quelques-uns des effets mentionnés. »

* « C'est une hypothèse que le soleil se lèvera demain, et cela signifie que nous ne *savons* pas s'il se lèvera. » Cette phrase connue est tirée de Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.36311.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 17 Quelques fréquences angulaires mesurées.

OBSERVATION	VITESSE ANGULAIRE $\omega = 2\pi/T$
Rotation de la Galaxie	$2\pi \cdot 0{,}14 \cdot 10^{-15}$ / s = 2π /220 $\cdot 10^6$ a
Rotation moyenne du Soleil autour de son axe	$2\pi \cdot 3{,}8 \cdot 10^{-7}$ / s = 2π / 30 d
Phare typique	$2\pi \cdot 0{,}08$/ s
Danseur de ballet faisant une pirouette	$2\pi \cdot 3$/ s
Moteur diesel de navire	$2\pi \cdot 5$/ s
Rotor d'un hélicoptère	$2\pi \cdot 5{,}3$/ s
Machine à laver	jusqu'à $2\pi \cdot 20$/ s
Flagelle bactérien	$2\pi \cdot 100$/ s
Moteur de voiture de course	jusqu'à $2\pi \cdot 600$/ s
Le moteur à turbine le plus rapide jamais construit	$2\pi \cdot 10^3$/ s
Les pulsars les plus rapides (étoiles en rotation)	jusqu'à au moins $2\pi \cdot 716$/ s
Ultracentrifugeuse	$> 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3$/ s
Roulette dentaire	jusqu'à $2\pi \cdot 13 \cdot 10^3$/ s
Rotation du proton	$2\pi \cdot 10^{20}$/ s
Fréquence angulaire de Planck, la plus grande fréquence possible	$2\pi \cdot 10^{35}$/ s

LA ROTATION

Le mouvement circulaire nous maintient en vie. Sans l'alternance du jour et de la nuit, nous serions morts de chaleur ou de froid, selon notre position sur le globe terrestre. Un court résumé sur la rotation est donc nécessaire. Nous avons vu auparavant qu'un corps est décrit par sa réticence à se mouvoir ; de manière similaire, un corps possède une réticence à tourner. Cette quantité est appelée son *moment d'inertie* et est communément notée Θ. La vitesse ou la fréquence de la rotation est signalée par la *vitesse angulaire*, usuellement notée ω. Quelques valeurs trouvées dans la nature sont données dans le Tableau 17.

Les quantités observables qui décrivent la rotation sont semblables à celles qui décrivent le mouvement de translation, comme indiqué dans le Tableau 18. Comme la masse, le moment d'inertie est défini de telle façon que la somme des *moments cinétiques* L – le produit du moment d'inertie par la vitesse angulaire – est conservée dans tout système qui n'interagit pas avec le monde extérieur :

$$\sum_i \Theta_i \omega_i = \sum_i L_i = \text{const} . \tag{18}$$

De la même façon que la conservation de la quantité de mouvement (ou « moment linéaire » [N.D.T.]) définit la masse, la conservation du moment cinétique (ou « moment angulaire » [N.D.T.]) définit le moment d'inertie.

Le moment d'inertie peut être lié à la masse et à la forme d'un corps. Si le corps est considéré comme étant constitué d'éléments de masse ou de volume très petits, l'expres-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 18 Correspondances entre mouvement de translation et de rotation.

QUANTITÉ	TRANSLATION		ROTATION	
État	temps	t	temps	t
	position	x	angle	φ
	quantité de mouvement	$p = mv$	moment cinétique	$L = \Theta\omega$
	énergie	$mv^2/2$	énergie	$\Theta\omega^2/2$
Mouvement	vitesse	v	vitesse angulaire	ω
	accélération	a	accélération angulaire	α
Réticence au mouvement	masse	m	moment d'inertie	Θ
Variation du mouvement	force	ma	couple	$\Theta\alpha$

sion qui en résulte est

$$\Theta = \sum_n m_n r_n^2 \,, \tag{19}$$

où r_n est la distance de l'élément de masse m_n à l'axe de rotation. Pouvez-vous confirmer cette expression ? Par conséquent, le moment d'inertie d'un corps dépend de l'axe de rotation choisi. Pouvez-vous vérifier qu'il en est ainsi pour le cube ?

Défi 139 e

Défi 140 s

Certes, la grandeur du moment d'inertie dépend également de la disposition de l'axe utilisé pour sa définition. Pour chaque direction d'axe différente, nous pouvons distinguer un moment d'inertie *intrinsèque*, lorsque l'axe traverse le centre de masse du corps, d'un moment d'inertie *extrinsèque*, lorsque ce n'est pas le cas*. De la même manière, nous distinguons les moments cinétiques intrinsèque et extrinsèque. (Par ailleurs, le *centre de masse* d'un corps est ce point imaginaire qui se déplace en ligne droite lors d'une chute verticale, même si le corps est en rotation. Pouvez-vous trouver une manière de déterminer sa position pour un corps en particulier ?)

Défi 142 s

Tout objet qui possède une orientation possède également un moment cinétique intrinsèque. (Qu'en est-il de la sphère ?) Toutefois, les particules ponctuelles n'ont pas de moment cinétique intrinsèque – du moins en première approximation. (Cette conclusion sera modifiée en théorie quantique.) Le moment cinétique *extrinsèque* **L** d'une particule ponctuelle est donné par

Défi 143 s

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \frac{2\mathbf{A}(T)m}{T} \quad \text{ainsi} \quad L = r\,p = \frac{2A(T)m}{T} \tag{21}$$

où **p** représente la quantité de mouvement de la particule, $\mathbf{A}(T)$ est la surface balayée par

* Les moments d'inertie intrinsèque et extrinsèque sont liés par la formule

$$\Theta_{\text{ext}} = \Theta_{\text{int}} + md^2 \,, \tag{20}$$

où d représente la distance entre le centre de masse et l'axe de rotation extrinsèque. Cette relation est appelée *théorème des axes parallèles de Steiner*. Êtes-vous apte à la démontrer ?

Défi 141 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

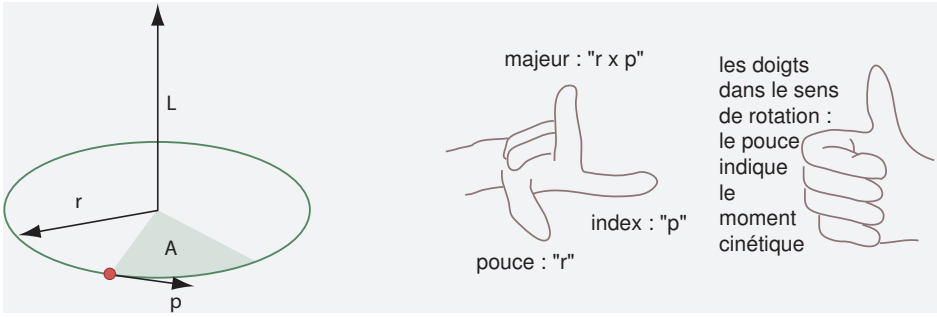


FIGURE 40 Moment cinétique et les deux versions de la règle de la main droite.

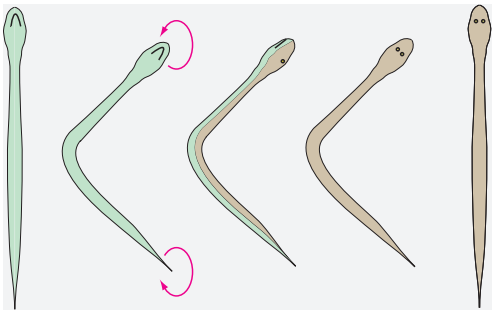


FIGURE 41 Comment un serpent se retourne autour de son axe.

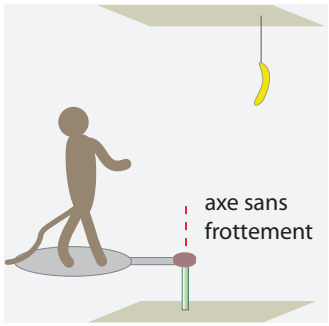


FIGURE 42 Le singe peut-il atteindre la banane ?

le vecteur position **r** de la particule pendant le temps T*. Le moment cinétique indique donc la direction de l'axe de rotation, en suivant la règle de la main droite, tel que montré sur la Figure 40.

Nous définissons alors une *énergie de rotation* associée comme

$$E_{\text{rot}} = \tfrac{1}{2}\Theta\,\omega^2 = \frac{L^2}{2\Theta}\,. \tag{23}$$

* Pour les curieux, le résultat du *produit vectoriel* $\mathbf{a}\times\mathbf{b}$ entre deux vecteurs **a** et **b** est défini comme étant un vecteur perpendiculaire à la fois aux deux vecteurs, dont l'orientation est donnée par la *règle de la main droite*, et dont la longueur est donnée par $ab\sin\sphericalangle(\mathbf{a},\mathbf{b})$, c'est-à-dire par l'aire du parallélogramme délimité par les deux vecteurs. À partir de cette définition, vous pouvez montrer que le produit vectoriel possède les propriétés suivantes : Défi 144 e

$$\begin{aligned}
&\mathbf{a}\times\mathbf{b} = -\mathbf{b}\times\mathbf{a} \quad , \quad \mathbf{a}\times(\mathbf{b}+\mathbf{c}) = \mathbf{a}\times\mathbf{b}+\mathbf{a}\times\mathbf{c} \quad , \quad \lambda\mathbf{a}\times\mathbf{b} = \lambda(\mathbf{a}\times\mathbf{b}) = \mathbf{a}\times\lambda\mathbf{b} \quad , \\
&\mathbf{a}\times\mathbf{a} = \mathbf{0} \quad , \quad \mathbf{a}(\mathbf{b}\times\mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{c}\times\mathbf{a}) = \mathbf{c}(\mathbf{a}\times\mathbf{b}) \quad , \quad \mathbf{a}\times(\mathbf{b}\times\mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{ac}) - \mathbf{c}(\mathbf{ab}) \quad , \\
&(\mathbf{a}\times\mathbf{b})(\mathbf{c}\times\mathbf{d}) = \mathbf{a}(\mathbf{b}\times(\mathbf{c}\times\mathbf{d})) = (\mathbf{ac})(\mathbf{bd}) - (\mathbf{bc})(\mathbf{ad}) \quad , \\
&(\mathbf{a}\times\mathbf{b})\times(\mathbf{c}\times\mathbf{d}) = \mathbf{c}((\mathbf{a}\times\mathbf{b})\mathbf{d}) - \mathbf{d}((\mathbf{a}\times\mathbf{b})\mathbf{c}) \quad , \\
&\mathbf{a}\times(\mathbf{b}\times\mathbf{c}) + \mathbf{b}\times(\mathbf{c}\times\mathbf{a}) + \mathbf{c}\times(\mathbf{a}\times\mathbf{b}) = 0\,.
\end{aligned} \tag{22}$$

Le produit vectoriel n'existe (pratiquement) que dans les espaces vectoriels à trois dimensions. (Voir l'Annexe ??.) Le produit vectoriel s'annule si et seulement si les vecteurs sont parallèles entre eux. Le parallélépipède délimité par les trois vecteurs **a**, **b** et **c** possède un volume $V = \mathbf{c}(\mathbf{a}\times\mathbf{b})$. La pyramide ou le tétraèdre formé à partir des trois vecteurs possède un sixième de ce volume. Page ?? Défi 145 e

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Cette expression est similaire à l'expression de l'énergie cinétique d'une particule. Pouvez-vous estimer la réponse à la question suivante : de combien de fois la grandeur de l'énergie cinétique de rotation de la Terre est-elle plus importante que la consommation annuelle d'électricité par l'humanité ? Si vous pouviez mettre la main sur un procédé qui permettrait de contrôler cette énergie, vous deviendriez illustre.

Défi 146 s

Comme dans la situation du mouvement de translation, l'énergie cinétique de rotation et le moment cinétique ne sont pas systématiquement conservés dans le monde macroscopique : l'énergie cinétique de rotation peut varier à cause des frottements, et le moment cinétique peut être modifié par des forces externes (les couples). Malgré tout, ces deux quantités sont toujours conservées à l'échelle microscopique pour des systèmes isolés.

Sur une surface parfaitement lisse, que l'on peut imiter avec de la glace polie ou avec une dalle de marbre badigeonnée d'une couche d'huile, il est impossible de se déplacer en avant. Pour réussir à bouger, nous avons besoin de nous appuyer *contre* quelque chose. Cela est-il également le cas pour la rotation ?

Bizarrement, il est possible de tourner même *sans* s'appuyer contre quelque chose. Vous pouvez l'expérimenter sur un fauteuil tournant de bureau bien lubrifié : simplement en tournant un bras au-dessus de la tête. Après chaque tour de bras, l'orientation de la chaise est rectifiée d'une petite quantité. Certes, la conservation du moment cinétique et de l'énergie cinétique de rotation n'empêche pas les corps de changer d'orientation. Les chats l'apprennent dans leur jeunesse. Une fois qu'ils se sont imprégnés de cette astuce, s'ils sont lâchés les pattes vers le haut, ils peuvent se retourner sur eux-mêmes de telle façon qu'ils atterrissent invariablement sur leurs pattes. Les serpents savent aussi comment se retourner sur eux-mêmes, comme le montre la Figure 41. Au cours des jeux Olympiques nous pouvons observer les véliplanchistes et les gymnastes exécuter des figures similaires. Sur ce point, la rotation est ainsi différente de la translation. (Pourquoi ?)

Réf. 61

Défi 147 d

Le moment cinétique est conservé. Cette allégation est valide pour tout axe, pourvu que le frottement ne joue aucun rôle, ou que des forces externes (couples) n'exercent aucune action. Pour entériner ce point, Jean-Marc Lévy-Leblond souleva le problème de la Figure 42. Le singe peut-il atteindre la banane sans quitter son plateau, en supposant que le plateau sur lequel le singe se trouve puisse tourner autour de l'axe sans aucun frottement ?

Réf. 3

Défi 148 s

DES ROUES EN ROTATION

La rotation est un phénomène intéressant à bien des égards. Une roue qui roule *ne* tourne *pas* autour de son axe, mais autour de son point de contact. Regardons cela de plus près.

Une roue de rayon R est en *rotation* si la vitesse de l'axe v_{axe} est reliée à la vitesse angulaire ω par

$$\omega = \frac{v_{\text{axe}}}{R} \,. \tag{24}$$

Pour tout point P situé sur la roue, à la distance r de l'axe, la vitesse v_{P} est la somme du mouvement de l'axe et du mouvement autour de l'axe. La Figure 43 montre que v_{P} est perpendiculaire à d, la distance entre le point P et le point de contact de la roue. La figure

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

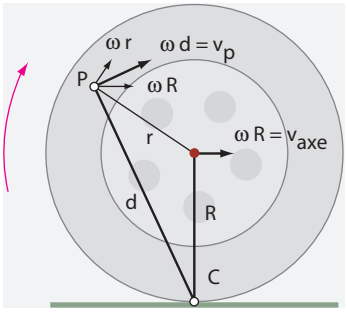


FIGURE 43 Les vitesses et les vecteurs unitaires pour une roue en rotation.

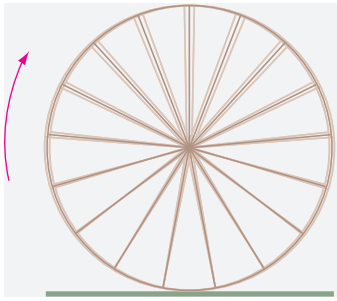


FIGURE 44 Une simulation d'une roue à rayons en rotation.

Défi 149 e montre également que le rapport des longueurs entre v_P et d est le même qu'entre v_{axe} et R. Par conséquent, nous pouvons écrire :

$$\mathbf{v}_P = \omega \times \mathbf{d} \,, \tag{25}$$

qui indique qu'une roue en rotation tourne en réalité autour de son point de contact avec le sol.

Curieusement, lorsqu'une roue roule, certains points situés dessus se déplacent en direction de l'axe de la roue, quelques autres demeurent à distance fixe par rapport à cet Défi 150 s axe et d'autres encore s'écartent de celui-ci. Pouvez-vous localiser ces différents points ? En même temps, ils nous amènent à découvrir des motifs captivants lorsqu'une roue à Réf. 62 rayons en rotation, telle qu'une roue de vélo, est photographiée.

À l'aide de ces résultats, vous pouvez entreprendre d'élucider le défi passionnant qui Réf. 63 suit. Lorsqu'une roue de bicyclette prend un virage sur une surface glissante, elle va déraper pendant un certain temps puis va continuer à rouler. De quelle façon la vitesse finale Défi 151 d dépend-elle de la vitesse initiale et du frottement ?

Comment marchons-nous ?

> « Le golf est une agréable promenade gâchée par une petite balle blanche. »
>
> Mark Twain

Pourquoi déplaçons-nous nos bras lorsque nous marchons ou courons ? Pour conserver l'énergie. En réalité, quand un mouvement du corps est exécuté avec le moins d'énergie possible, il est naturel et gracieux. (Cela peut en fait être considéré comme étant la véritable définition de la grâce. Cette relation est un fait notoire dans le monde de la Réf. 17 danse. C'est également un aspect élémentaire des méthodes utilisées par les acteurs pour apprendre à déplacer leur corps aussi gracieusement que possible.)

Pour vous convaincre vous-même de l'économie d'énergie en jeu, tentez de marcher ou courir avec vos bras figés ou en mouvement dans la direction opposée à la direction habituelle : l'effort requis est considérablement plus important. Quand une jambe se déplace, elle produit un couple autour de l'axe du corps qui demande à être contrebalancé.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

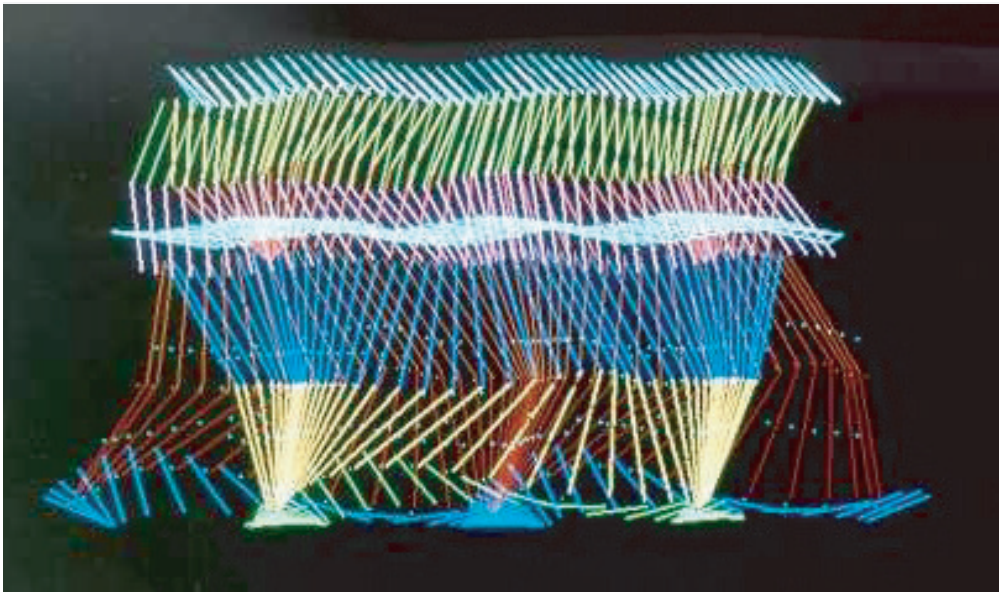


FIGURE 45 La décomposition du mouvement d'un homme qui marche. (© Ray McCoy)

La stratégie qui utilise le moins d'énergie est de balancer les bras. Puisque les bras sont plus légers que les jambes, ils doivent se déplacer plus loin par rapport à l'axe du corps pour compenser la quantité de mouvement. L'évolution a ainsi déplacé le point d'attache des bras, les épaules, beaucoup plus loin que celui des jambes, les hanches. Les animaux qui ont deux jambes mais pas de bras, comme les pingouins ou les pigeons, marchent beaucoup plus laborieusement, ils sont contraints de déplacer leur tronc corporel entier à chaque pas.

Réf. 64

Quels muscles effectuent le plus d'effort lors de la marche, ce mouvement que les spécialistes nomment la *démarche* ? En 1980, Serge Gracovetsky a découvert que, dans la démarche humaine, l'essentiel de la force est fourni par les muscles situés le long de l'*épine dorsale*, et non par ceux des jambes. (En fait, les individus dépourvus de jambes sont toujours capables de marcher.) Lorsque vous effectuez un pas, les muscles lombaires redressent l'épine dorsale, ce qui l'oblige mécaniquement à tourner un peu d'un côté, de sorte que le genou de la jambe de ce côté vienne automatiquement en avant. Quand le pied se déplace, les muscles lombaires peuvent se relâcher et à nouveau se redresser au pas suivant. En fait, nous pouvons ressentir l'augmentation de la tension des muscles

Défi 152 e

dorsaux lors de la marche sans nécessairement déplacer les bras, confirmant ainsi où se trouve le moteur corporel.

Les jambes humaines diffèrent de celles des singes sur un plan fondamental : les humains sont capables de courir. Il se trouve que le corps humain tout entier a été taillé pour la course, une aptitude qu'aucun autre primate ne possède. Le corps humain s'est dépouillé de sa toison pour obtenir un meilleur refroidissement, a développé la capacité de courir tout en gardant la tête en position stable, a développé la longueur adéquate des bras pour un équilibre approprié lors de la course, et possède même un ligament particulier dans le dos qui fonctionne comme un amortisseur pendant celle-ci. Autrement dit, de toutes les formes de mouvement, c'est la course qui est la plus humaine.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

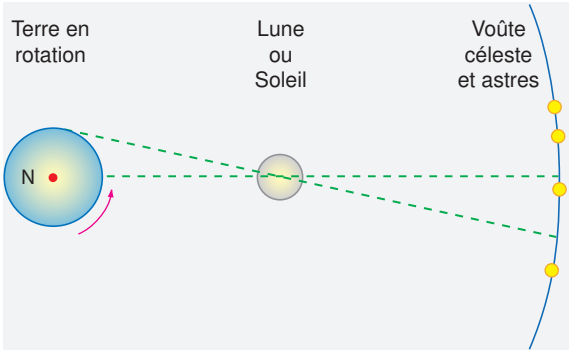
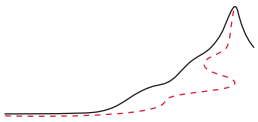


FIGURE 46 La parallaxe – non dessinée à l'échelle.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 5

DE LA ROTATION DE LA TERRE À LA RELATIVITÉ DU MOUVEMENT

> « Eppur si muove ! »
>
> Anonyme*

La quête des réponses à cette question donne un magnifique panorama de l'histoire de la physique classique. Aux environs de l'an 265 av. J.-C., le penseur grec Aristarque
Réf. 65 de Samos s'évertuait à soutenir que la Terre tourne. Il avait mesuré la parallaxe de la Lune (aujourd'hui estimée à près de 0,95°) et celle du Soleil (aujourd'hui connue comme étant de 8,8′)**. La *parallaxe* est une notion captivante, c'est l'angle qui décrit la différence entre les positions d'un corps sur la voûte céleste lorsqu'il est vu par un observateur situé sur la surface de la Terre et lorsqu'il est vu par un observateur hypothétique situé au centre de la Terre (voir la Figure 46). Aristarque avait remarqué que la Lune et le Soleil *oscillent* dans le firmament, et que cette oscillation a une période de 24 heures. Il en conclut alors que la Terre tourne.

Page 17 La mesure de l'aberration de la lumière, qui peut être détectée avec un télescope lorsque nous admirons les étoiles, démontre également la rotation de la Terre. L'*aberration* est une anomalie dans la direction d'arrivée de la lumière, elle sera bientôt expliquée. À l'équateur, la rotation de la Terre ajoute une déviation angulaire de 0,32′, changeant de signe toutes les 12 heures, à l'aberration due au mouvement de la Terre autour du Soleil, d'environ 20,5′. À notre époque moderne, les astronomes ont accumulé un grand nombre de pièces à conviction supplémentaires, mais aucune d'entre elles n'est accessible à l'homme de la rue.

Par ailleurs, les mesures indiquant que la Terre n'est pas une sphère parfaite, mais qu'elle est *aplatie* aux pôles, confirment la rotation de la Terre. De nouveau, toutefois, cette mesure du dix-huitième siècle réalisée par Maupertuis*** n'est pas accessible à notre observation quotidienne.

C'est alors que, dans les années 1790 à 1792 à Bologne, Giovanni Battista Guglielmini (1763–1817) parvint finalement avec succès à mesurer ce que Galilée et Newton avaient postulé être la preuve la plus simple de la rotation de la Terre. Sur la Terre, les objets

* « Et pourtant elle tourne ! » est la phrase faussement attribuée à Galilée à propos de la Terre. Il est vrai, cependant, que lors de son procès il fut contraint de rétracter publiquement son idée d'une Terre en mouvement pour garder la vie (voir la note du bas de la page 229).

** Pour la définition des angles voir la page 52, et pour la définition des unités angulaires voir l'Annexe B.

*** Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759), physicien et mathématicien français. Il fut un des personnages clés dans la quête du principe de moindre action, qu'il nomma de cette manière. Il fut également nommé président de l'Académie des sciences de Berlin.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

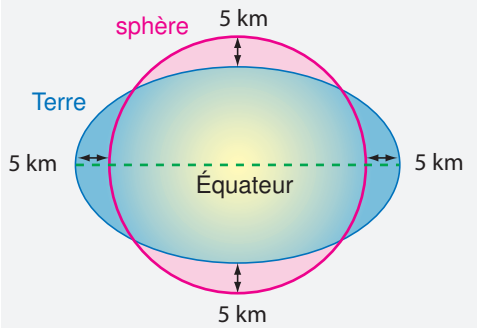


FIGURE 47 Déviation à la forme sphérique de la Terre due à sa rotation.

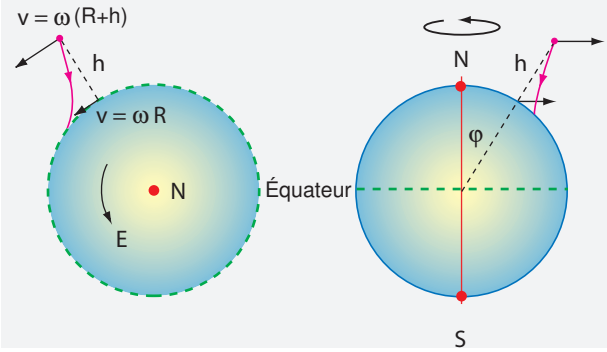


FIGURE 48 Les déviations de la chute libre en direction de l'est et en direction de l'équateur dues à la rotation de la Terre.

ne chutent pas verticalement, mais sont légèrement déviés vers l'est. Cette déviation survient parce qu'un objet conserve sa vitesse horizontale, celle qu'il a au point culminant à partir duquel il commence à tomber, comme indiqué sur la Figure 48. La découverte de Guglielmini fut la première pièce à conviction non astronomique de la rotation de la Terre. Les expériences furent renouvelées en 1802 par Johann Friedrich Benzenberg (1777–1846). En utilisant des boules métalliques qu'il lâcha de la tour de l'église Saint-Michel à Hambourg – d'une hauteur de 76 m – Benzenberg trouva que la déviation vers l'est était de 9,6 mm. Pouvez-vous confirmer que la valeur mesurée par Benzenberg concorde à peu près avec l'hypothèse que la Terre fait un tour sur elle-même toutes les 24 heures ? (Il y a également une déviation plus petite en direction de l'équateur, qui ne fut pas mesurée par Guglielmini, Benzenberg ou quiconque après eux jusqu'à ce jour, cependant cela complète la liste des effets de la rotation de la Terre sur la chute libre.) Ces deux déviations sont aisément compréhensibles si nous nous rappelons que les objets qui chutent décrivent une ellipse autour du centre de la Terre en rotation. Cette forme elliptique indique que la trajectoire d'une pierre lancée en l'air ne se situe pas dans un plan pour un observateur debout sur la Terre. Pour un tel observateur, la trajectoire exacte ne peut donc être dessinée sur une feuille de papier.

Défi 153 pe

En 1835, l'ingénieur et mathématicien Gustave-Gaspard Coriolis (1792–1843), le citoyen français qui a également introduit les concepts modernes de « travail » et d'« énergie cinétique », mit le doigt sur un effet étroitement lié que personne n'avait jusqu'alors remarqué dans la vie courante. Un objet qui voyage dans un espace en rotation ne se

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

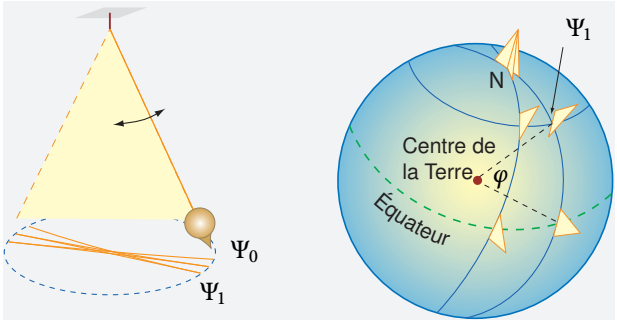


FIGURE 49 Le mouvement circulaire d'un pendule dévoilant la rotation de la Terre.

déplace par le long d'une ligne droite. Si la rotation est antihoraire, comme pour l'hémisphère Nord de la Terre, la vitesse d'un objet est légèrement détournée vers la droite, bien que sa grandeur reste constante. Cette notion ainsi nommée *accélération de Coriolis* (ou force de Coriolis) est provoquée par la variation de la distance à l'axe de rotation. Défi 154 s Pouvez-vous en déduire son expression analytique, à savoir $\mathbf{a}_C = 2\omega \times \mathbf{v}$?

L'accélération de Coriolis explique la tendance qu'ont de nombreux phénomènes à grande échelle à adopter une forme en spirale, tels le sens des cyclones et anticyclones en météorologie, le modèle global des vents sur la Terre et la variation des courants océaniques et des marées. Plus admirablement, l'accélération de Coriolis explique pourquoi les icebergs ne suivent pas la direction du vent lorsqu'ils dérivent en s'éloignant des ca- Réf. 66 lottes polaires. L'accélération de Coriolis joue aussi un rôle dans la trajectoire des boulets de canon (ce qui était la motivation initiale de Coriolis), dans les lancements de satellites, dans le déplacement des taches solaires et même dans le mouvement des électrons dans Réf. 67 les molécules. Tous ces phénomènes sont de signes opposés dans les hémisphères Nord et Sud et, par conséquent, prouvent la rotation de la Terre. (Durant la Première Guerre mondiale, plusieurs artilleurs de la force navale américaine ratèrent leurs cibles dans l'hémisphère Sud parce que les ingénieurs avaient calibré les canons en tenant compte de l'effet de Coriolis valable pour l'hémisphère Nord.)

Ce n'est qu'en 1962, après plusieurs tentatives antérieures de la part d'autres cher- Réf. 68 cheurs, qu'Asher Shapiro put vérifier le premier que l'effet de Coriolis avait une influence imperceptible sur la direction du tourbillon formé par l'écoulement de l'eau dans une baignoire. À la place d'une baignoire ordinaire, il eut besoin d'utiliser une installation expérimentale soigneusement conçue parce que, contrairement à une affirmation courante, cet effet ne peut être perçu dans une vraie baignoire. Il y parvint seulement en éliminant prudemment toutes les perturbations sur le système. Par exemple, il attendit 24 heures après le remplissage de la cuve (et en vérité ne céda jamais sa place à quelqu'un d'autre durant tout ce temps !) afin d'éviter tout mouvement résiduel de l'eau qui aurait pu perturber l'effet, et construisit un mécanisme d'ouverture, établi consciencieusement, entièrement symétrique par rotation. D'autres ont renouvelé l'expérience dans l'hémi- Réf. 68 sphère Sud, confirmant le résultat. En d'autres termes, la tendance qu'ont les tourbillons des baignoires ordinaires à tourner n'est *pas* causé par la rotation de la Terre, mais résulte de la manière dont l'eau commence à s'écouler. Mais continuons avec l'histoire de la rotation de la Terre.

Finalement, en 1851, le médecin français reconverti à la physique Jean Bernard Léon

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

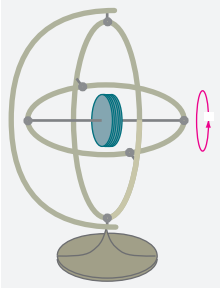


FIGURE 50 Le gyroscope.

Foucault (n. Paris 1819, d. Paris 1868) réalisa une expérience qui ôta tout scepticisme à cet égard et le rendit mondialement célèbre en l'espace de pratiquement une seule nuit. Il suspendit un pendule long de 67 m* au Panthéon à Paris et montra au public stupéfait que la direction de ses oscillations variait au cours du temps, en tournant lentement. Pour quiconque ayant quelques minutes de patience pour observer le changement de direction, l'expérience prouvait que la Terre tourne. Si la Terre ne tournait pas, le balancement du pendule se serait toujours effectué dans la même direction. Sur une Terre qui tourne, la direction varie vers la gauche, tel qu'indiqué sur la Figure 49, à moins que le pendule ne soit situé à l'équateur**. Le temps pendant lequel l'orientation du balancement fait un tour complet – le temps de précession – peut être calculé. Étudiez un pendule oscillant dans la direction nord-sud et vous trouverez que le temps de précession T_{Foucault} est donné par

Défi 156 d

$$T_{\text{Foucault}} = \frac{24\,\text{h}}{\sin\varphi} \tag{26}$$

où φ est la latitude de la position du pendule, c'est-à-dire 0° à l'équateur et 90° au pôle Nord. Cette formule est un des résultats les plus admirables de la cinématique galiléenne***.

Foucault fut également l'inventeur du *gyroscope* et celui qui le baptisa ainsi. Il construisit l'appareil, présenté sur la Figure 50, en 1852, un an après son pendule. Avec celui-ci, il démontra une nouvelle fois la rotation de la Terre. Puisqu'un gyroscope tourne, son axe demeure fixe dans l'espace – mais seulement lorsqu'il est observé depuis des étoiles ou des galaxies lointaines. (Ce n'est pas la même chose que de parler d'espace absolu. Pourquoi ?) Pour un observateur situé sur Terre, la direction de l'axe varie régulièrement avec une période de 24 heures. Les gyroscopes sont maintenant utilisés de manière routinière sur les bateaux et dans les avions pour donner la direction du nord, parce qu'ils sont

Défi 157 s

Défi 155 d
Réf. 69

* Pourquoi un pendule si long est-il nécessaire ? En comprendre les raisons nous permet de refaire l'expérience chez nous, en utilisant un pendule court de 70 cm, avec des manipulations astucieuses.

** La découverte montre également comment la précision et le génie sont pieds et poings liés. En fait, la première personne à observer cet effet fut Vincenzo Viviani, un élève de Galilée, dès 1661 ! Foucault a sûrement lu le travail de Viviani dans les publications de l'Accademia dei Lincei (l'Académie des Lynx, la plus ancienne académie purement scientifique d'Europe, fondée à Rome en 1603 [N.D.T.]). Mais il fallut le génie de Foucault pour associer cet effet à la rotation de la Terre, personne ne le fit avant lui.

*** Le calcul de la période du pendule de Foucault présuppose que le rythme de précession est constant durant une rotation. Ce n'est qu'une approximation (bien que généralement excellente).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

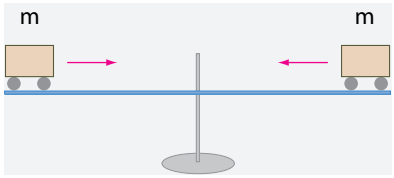


FIGURE 51 Montrer la rotation de la Terre par le truchement de la rotation d'un axe.

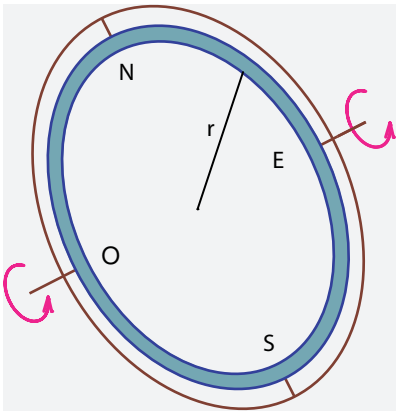


FIGURE 52 Démontrer la rotation de la Terre avec de l'eau.

beaucoup plus précis et fiables que les boussoles magnétiques. Dans les modèles les plus récents, nous utilisons la course circulaire de rayons laser au lieu de masses en rotation*.

En 1909, Roland von Eőtvős mesura un effet ordinaire : en raison de la rotation de la Terre, le poids d'un objet dépend de la direction dans laquelle il se déplace. Par conséquent, une balance en rotation autour de l'axe vertical ne reste pas en parfaite position horizontale : la balance commence à osciller délicatement. Pouvez-vous expliquer l'origine de cet effet ?

Défi 159 s

En 1910, John Hagen publia les résultats d'une expérience encore plus simple, proposée par Louis Poinsot en 1851. Deux masses sont posées sur une barre horizontale qui peut tourner autour d'un axe vertical, un dispositif connu sous le nom d'*isotoméographe*. Si les deux masses sont déplacées lentement vers le support, tel que montré sur la Figure 51, et si le frottement est négligeable, les barres tournent. Certes, ceci ne surviendrait pas si la Terre ne tournait pas. Pouvez-vous donner une explication à cette observation ? Cet effet peu connu est également utile pour que les physiciens fassent des paris entre eux.

Réf. 70

Défi 160 s

En 1913, Arthur Compton montra qu'on peut tirer profit d'un tuyau fermé rempli d'eau et de quelques minuscules particules en suspension (ou des bulles) pour montrer que la Terre tourne. Cet appareil est appelé un *tube de Compton* ou une *roue de Compton*. Compton montra que, lorsqu'un tube horizontal rempli d'eau est tourné de 180°, quelque chose se produit qui nous permet de démontrer que la Terre tourne. L'expérience, indiquée sur la Figure 52, permet même de mesurer la latitude du point où l'expérience est réalisée. Pouvez-vous deviner ce qui se passe ?

Réf. 82

Défi 161 d

En 1925, Albert Michelson** et ses collaborateurs dans l'Illinois construisirent un interféromètre sous vide d'un périmètre invraisemblable de 1,9 km. Les interféromètres produisent des franges lumineuses brillantes et sombres, l'emplacement des franges dépendant de la vitesse avec laquelle l'interféromètre tourne. Le décalage des franges est dû

Page ??

Défi 158 s

* Pouvez-vous deviner comment la rotation est détectée dans ce cas précis ?

** Albert Abraham Michelson (n. Strzelno 1852, d. Pasadena 1931), physicien prussien puis polonais, et enfin américain des États-Unis. Il était obsédé par la mesure précise de la vitesse de la lumière, et reçut le prix Nobel de physique en 1907.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à un effet mesuré pour la première fois en 1913 par le physicien français Georges Sagnac : la rotation d'un interféromètre circulaire tout entier d'une vitesse angulaire (vecteur) **Ω**
Défi 162 s produit un décalage de phase angulaire $\Delta\varphi$ de la frange, donné par

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi\,\mathbf{\Omega}\,\mathbf{A}}{c\,\lambda} \tag{27}$$

où **A** est la superficie (vecteur) du domaine encerclé par les deux rayons lumineux qui interfèrent, λ est leur longueur d'onde et c la vitesse de la lumière. Cet effet est dorénavant
Réf. 71 nommé l'*effet Sagnac*, même s'il avait été prédit 20 ans auparavant par Oliver Lodge*. Michelson et son équipe décelèrent un décalage de frange d'une période de 24 heures, dont la grandeur était exactement celle prévue par la rotation de la Terre. Des versions récentes de haute précision utilisent des lasers en anneau sur des surfaces de quelques mètres carrés seulement, mais capables de détecter des variations dans le rythme de rotation de la Terre de moins d'une partie par million. En réalité, au cours d'une année, la durée d'une journée fluctue de façon irrégulière de quelques millisecondes, principalement à cause des influences du Soleil et de la Lune, à cause des changements climatiques
Réf. 72 et de la convection du magma brûlant au cœur de la Terre**. Mais les tremblements de terre, le phénomène climatique El Niño et le remplissage des énormes digues fluviales ont également des répercussions sur la rotation de la Terre. Tous ces effets peuvent être étudiés avec la précision adéquate par des interféromètres ; ceux-ci peuvent également être utilisés dans la recherche sur les mouvements de la croûte terrestre provoqués par les marées lunaires ou les tremblements de terre, et dans les vérifications de la validité de la théorie de la relativité.

En résumé, les observations démontrent que la surface de la Terre tourne à raison de 463 m/s à l'équateur, une valeur plus grande que celle de la vitesse du son dans l'air – environ 340 m/s dans des conditions normales – et qu'en réalité nous *tournoyons* à travers le cosmos.

Comment la terre tourne-t-elle ?

La rotation de la Terre est-elle *constante* à l'échelle des temps géologiques ? C'est une question ardue. Si vous pouviez découvrir une méthode qui pourrait apporter une réponse, publiez-la ! (Ceci est également vrai pour la question de savoir si la durée de l'an-
Réf. 73 née est constante.) Seul un petit nombre de méthodes sont connues, comme nous allons le découvrir par la suite.

La rotation de la terre n'est pas constante même pendant la durée d'une vie humaine. Elle varie de quelques parties pour 10^8. Plus précisément, à l'échelle des temps « séculaires », la durée de la journée augmente d'environ 1 ou 2 ms par siècle, principalement à cause des frottements provoqués par la Lune (les marées, les mouvements de la croûte terrestre [N.D.T.]), et par la fonte des glaciers polaires. C'est ce qui ressort de l'analyse

* Oliver Lodge (1851–1940) était un physicien britannique qui étudia les ondes électromagnétiques et tenta de communiquer avec les morts. Personnalité étrange mais influente, ses idées sont fréquemment citées lorsque l'on allie divertissement et physique. Par ailleurs, il fut un des (rares) physiciens persuadés à la fin du dix-neuvième siècle que la physique était achevée.

** L'effet de la croissance des feuilles des arbres sur le changement du moment d'inertie de la Terre, déjà examiné en 1916 par Harold Jeffreys, est trop insignifiant pour être perçu, du moins jusqu'à présent.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

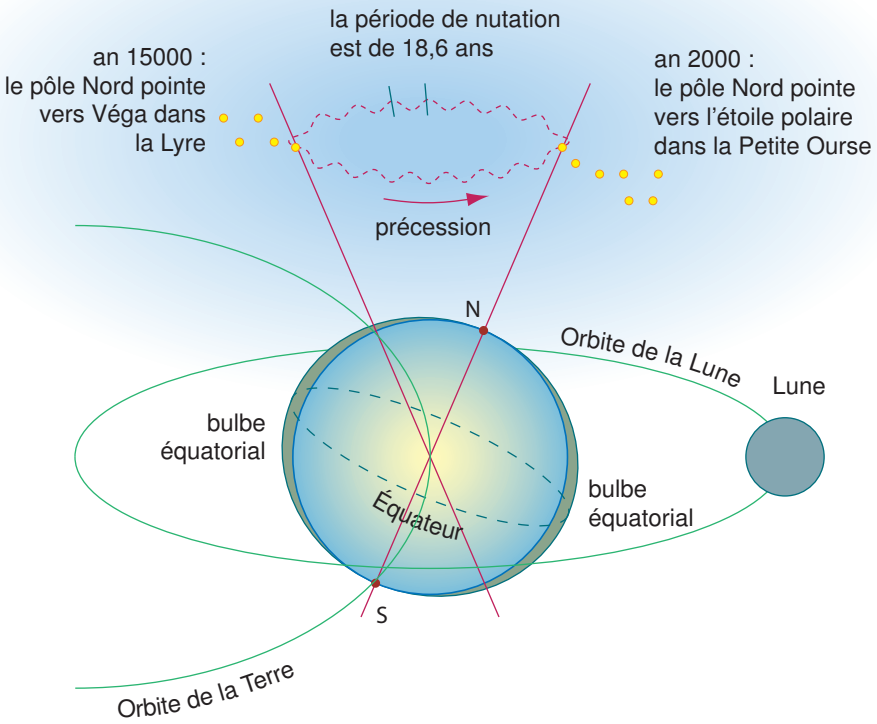


FIGURE 53 La précession et la nutation de l'axe de la Terre.

des observations astronomiques historiques consignées par les anciens astronomes baby-
Réf. 74 loniens et arabes. Des variations « décennales » supplémentaires d'une amplitude de 4 ou 5 ms sont causées par les mouvements de convection de la partie liquide du noyau de la Terre.

Des variations semestrielles et saisonnières de la longueur du jour – d'une amplitude de 0,4 ms tous les six mois, une autre de 0,5 ms sur l'année, et une de 0,08 ms au bout de 24 à 26 mois – sont essentiellement provoquées par les effets de l'atmosphère. Dans les années 1950, la disponibilité de mesures précises a montré qu'il existe même une variation de 0,2 ms de période de 14 et 28 jours, due à la Lune. Dans les années 1970, la découverte d'oscillations dans les vents, sur une échelle de temps d'environ 50 jours, montra qu'elles modifiaient la longueur du jour selon une amplitude d'environ 0,25 ms. Toutefois, ces dernières variations sont totalement irrégulières.

Mais tout compte fait, pourquoi la terre tourne-t-elle ? La rotation de la Terre tire son origine de la rotation du nuage de gaz qui a créé le Système solaire. Ce contexte explique pourquoi le Soleil et toutes les planètes, sauf une, tournent sur eux-mêmes dans le même sens, et pourquoi toutes les planètes tournent autour du Soleil dans ce même sens. Mais
Réf. 75 le récit complet de cette histoire sort du cadre de ce manuel.

La rotation autour de son axe n'est pas le seul mouvement de la Terre, elle réalise éga-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lement d'autres mouvements. On le savait déjà depuis très longtemps. En 128 av. J.-C., l'astronome grec Hipparque découvrit ce qui est aujourd'hui appelé la *précession (des équinoxes)*. Il avait confronté une mesure qu'il avait faite lui-même avec une autre faite 169 ans plus tôt. Hipparque remarqua alors que l'axe de la Terre pointait dans la direction d'astres différents à des moments différents. Il en conclut que la voûte céleste se déplaçait. Aujourd'hui nous préférons dire que c'est l'axe de la Terre qui bouge. En l'espace d'une période de 25 800 ans, l'axe dessine un cône avec un angle ouvert de 23,5°. Ce mouvement, dessiné sur la Figure 53, est engendré par les forces de marées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre, ce qui a aussi pour conséquence de façonner son aplatissement. Le Soleil et la Lune essayent d'aligner l'axe de la Terre perpendiculairement à la trajectoire de celle-ci, ce couple conduisant à la précession de l'axe de la Terre. (Le même effet survient avec n'importe quelle toupie ou dans l'expérience avec les roues suspendues montrée à la page 170.)

De plus, l'axe de la Terre n'est pas fixe non plus par rapport à sa surface. En 1884, en mesurant l'angle exact du pôle Nord céleste au-dessus de l'horizon, Friedrich Küstner (1856–1936) remarqua que l'axe de la Terre *se déplaçait* par rapport à l'écorce terrestre, tel que Bessel l'avait suggéré 40 ans plus tôt. Comme conséquence de la découverte de Küstner, le Service international des latitudes (International Latitude Service, ou ILS [N.d.T.]) fut créé. Il s'avéra que le *mouvement polaire* que Küstner avait découvert était constitué de trois composantes : une légère dérive longitudinale – non encore élucidée –, un mouvement elliptique annuel dû aux variations saisonnières des masses d'air et d'eau, et un mouvement circulaire* d'une période d'environ 1,2 année causé par les fluctuations de la pression exercée dans les bas-fonds des océans. Concrètement, le
Réf. 76 pôle Nord se déplace d'une distance de 15 m autour d'une position centrale moyenne.

En 1912, le météorologiste allemand et géophysicien Alfred Wegener (1880–1930) découvrit un phénomène encore plus important. Après avoir étudié les formes des plateaux continentaux et les strates géologiques des deux côtés de l'Atlantique, il conjectura que les continents *se déplacent*, et qu'ils sont tous des fragments d'un seul continent originel qui s'est brisé il y a 200 millions d'années**.

Bien qu'elle fût d'abord tournée en dérision tout autour du globe, la découverte de Wegener était correcte. Les relevés des satellites modernes, indiqués sur la Figure 54, confirment ce modèle. Par exemple, le continent américain s'éloigne du continent européen d'environ 10 mm par an. Certains conjecturent également que cette vitesse a pu être plus importante à certaines époques dans le passé. La manière de le vérifier est d'observer la magnétisation des roches sédimentaires. Aujourd'hui, c'est toujours un domaine de la recherche de pointe. En suivant la version moderne de ce modèle, appelé la *tectonique des plaques*, les continents (d'une masse volumique de $2{,}7 \cdot 10^3$ kg/m^3) flottent sur le manteau fluide de la Terre (d'une masse volumique de $3{,}1 \cdot 10^3$ kg/m^3) comme des frag-

* Ce mouvement circulaire, un vacillement, fut prédit par le grand mathématicien suisse Leonhard Euler (1707–1783). En faisant usage de cette prédiction et des données de Küstner, Seth Chandler proclama en 1891 être l'initiateur de cette composante circulaire.

** Dans cet ancien supercontinent, appelé Gondwana, il y avait un fleuve colossal qui s'écoulait vers l'ouest depuis le Tchad jusqu'à Guayaquil en Équateur. Après que le continent se fut divisé, ce fleuve continua à s'écouler vers l'ouest. Lorsque la cordillère des Andes s'éleva, l'eau fut entravée dans sa course, et plusieurs millions d'années plus tard, elle s'écoula en sens inverse. Aujourd'hui, ce fleuve s'écoule toujours vers l'est et est appelé l'Amazone.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

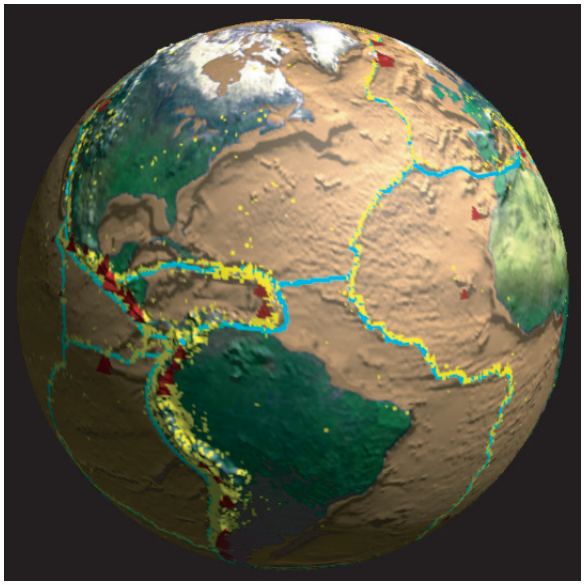


FIGURE 54 Les plaques continentales sont les objets d'étude du mouvement tectonique.

Page 107, page ??
Réf. 77

ments de liège sur de l'eau,, la convection à l'intérieur du manteau terrestre constituant le moteur de ce mouvement.

La Terre se déplace-t-elle ?

Le centre de gravité de la Terre n'est pas au repos par rapport à l'univers. Durant le troisième siècle av. J.-C. Aristarque de Samos proférait avec véhémence que la Terre tourne autour du Soleil. Cependant, le fait que les étoiles aient une apparence identique tout au long de l'année représente un obstacle fondamental au système héliocentrique. Comment est-ce possible puisque la Terre voyage autour du Soleil ? La distance entre la Terre et le Soleil était connue depuis le dix-septième siècle, mais c'est seulement en 1837 que Friedrich Wilhelm Bessel* parvint, le premier, à observer la *parallaxe* d'un astre. Ce fut le résultat de mesures extrêmement attentives et de calculs compliqués : il inventa les *fonctions de Bessel* afin de pouvoir y parvenir. Il fut capable de déceler une étoile, 61 Cygni, dont la position apparente changeait en fonction des mois de l'année. Observée durant une année entière, l'étoile décrit une petite ellipse dans le ciel, d'une ouverture d'angle de 0,588″ (c'est la valeur moderne). Après avoir soigneusement écarté toutes les autres explications possibles, Bessel déduisit que la variation de la position était due au mouvement de la Terre autour du Soleil, et, à partir de la taille de l'ellipse, il détermina la distance de l'étoile à 105 Pm, ou 11,1 années-lumière.

Défi 163 s

Bessel avait donc accompli pour la première fois l'estimation de la distance d'une étoile. Ce faisant, il prouvait également que la Terre n'est pas fixe par rapport aux étoiles dans le ciel et qu'elle effectue en réalité des révolutions autour du Soleil. Ce mouvement lui-même n'était pas une surprise. Il confirmait le résultat sur l'aberration de la lumière

* Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846), astronome allemand, délaissa une carrière prospère dans les affaires pour dédier sa vie aux étoiles et devint le principal astronome de son époque.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

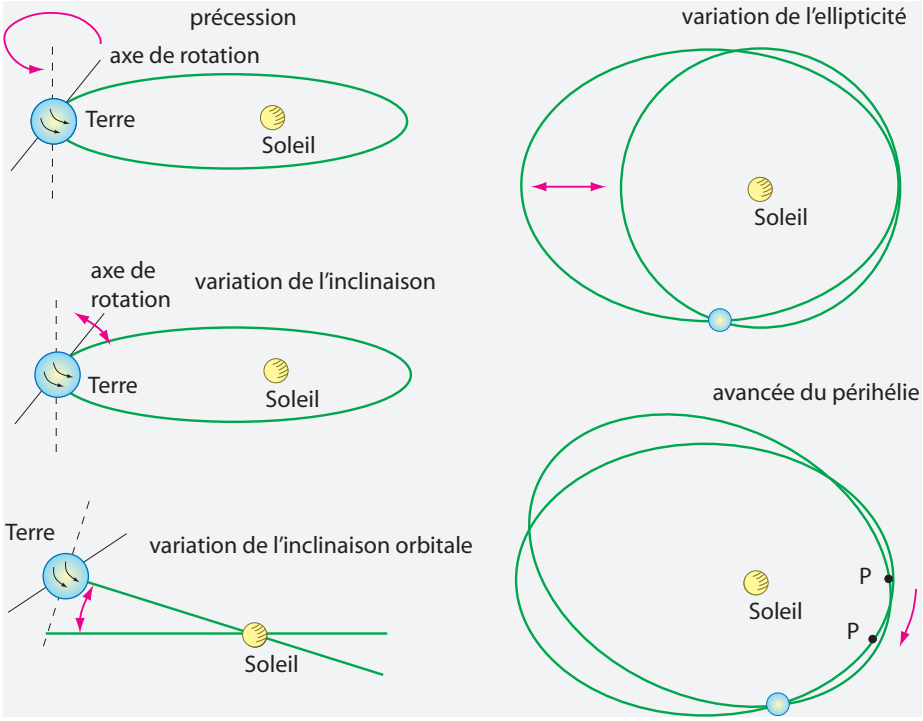


FIGURE 55 Variations du mouvement de la Terre autour du Soleil.

Page 17 mentionné plus haut, découvert en 1728 par James Bradley* et qui sera bientôt évoqué. La Terre tourne autour du Soleil.

Avec le perfectionnement des télescopes, d'autres mouvements de la Terre furent découverts. En 1748, James Bradley déclara qu'il existe une minuscule *variation* régulière de la précession, qu'il nomma la *nutation*, d'une période de 18,6 années et d'une amplitude angulaire de 19,2″. La nutation se produit parce que le plan de l'orbite de la Lune autour de la Terre ne coïncide pas exactement avec le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Seriez-vous capable de vérifier que cette situation induit la nutation ?

Défi 164 pe

Les astronomes ont également découvert que l'inclinaison de 23,5° – ou l'*obliquité* – de l'axe de la Terre, qui représente l'angle entre son moment cinétique intrinsèque et son moment cinétique orbital, varie en réalité de 22,1° à 24,5° tous les 41 000 ans. Ce mouvement est provoqué par l'attraction du Soleil et les écarts de la forme de la Terre par rapport à la sphère parfaite. Pendant la Seconde Guerre mondiale, en 1941, l'astronome serbe Milutin Milankovitch (1879–1958) se retrancha dans l'isolement et en étudia les conséquences. Dans ses recherches il s'est rendu compte que cette période d'inclinaison de 41 000 années ainsi qu'une période moyenne de 22 000 ans de précession** ont provoqué l'avènement de plus de 20 *périodes glaciaires* durant les derniers 2 millions d'années.

* James Bradley, (1693–1762), astronome anglais. Il fut un des premiers astronomes à saisir l'importance des mesures précises et modernisa complètement l'Observatoire de Greenwich, dans la banlieue de Londres. Il découvrit l'aberration de la lumière, une innovation qui montrait que la Terre se déplace et qui lui permettait également de mesurer la vitesse de la lumière. Il découvrit aussi la nutation de la Terre.

** Il se trouve que la précession de 25 800 ans a provoqué trois ères caniculaires, de 23 700, 22 400 et 19 000 ans, dues aux interactions entre la précession et l'avancée du périhélie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

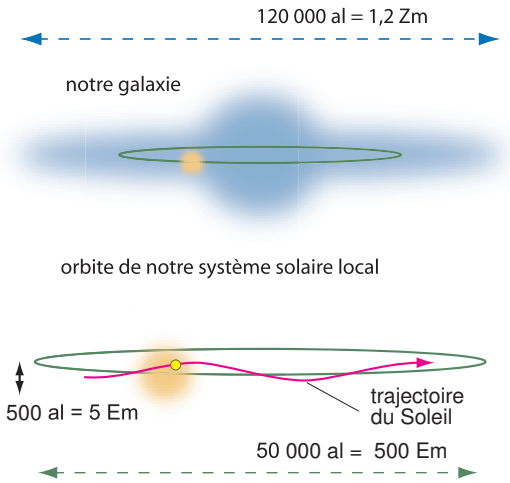


FIGURE 56 Déplacement du Soleil au sein de la Galaxie.

Ce phénomène survient suite à une exposition plus ou moins forte des pôles au Soleil. Les quantités variables de glace fondue conduisent alors à des variations de la température moyenne. La dernière ère glacière a vu son apogée il y a environ 20 000 ans et s'est achevée il y a quelque 11 800 ans, la prochaine est encore loin de nous. Une confirmation éclatante des cycles des ères glacières, sans compter les nombreuses pièces à conviction géologiques, est fournie par les relevés des rapports des isotopes de l'oxygène dans les sédiments marins, ce qui permet de retracer l'évolution de la température moyenne durant le dernier million d'années.

Réf. 78

L'orbite de la Terre modifie également son *excentricité* au cours du temps, passant d'une forme entièrement circulaire à légèrement ovale et ainsi de suite. Toutefois, cela se produit selon un schéma très complexe, sans aucune régularité périodique, et est engendré par l'influence des grosses planètes du Système solaire sur l'orbite terrestre. L'échelle de temps caractéristique est de l'ordre de 100 000 à 125 000 ans.

De plus, l'*inclinaison* de l'orbite terrestre varie par rapport à l'orbite des autres planètes, de +2,5° à −2,5° et vice versa. Cela semble se produire régulièrement tous les 100 000 ans.

Même la direction vers laquelle l'ellipse se dirige varie avec le temps. Ce phénomène, connu sous le nom d'*avancée du périhélie*, est dû en grande partie à l'influence des autres planètes ; le reste, une petite partie résiduelle, sera capital dans le chapitre sur la relativité générale. Ce fut la première donnée expérimentale qui confirma la théorie.

De toute évidence, la longueur de l'année varie également au cours du temps. Les écarts mesurés sont de l'ordre de quelques parties pour 10^{11} soit environ 1 ms par an. Cependant, la connaissance de ces variations et de leurs sources est beaucoup plus rudimentaire que celle des oscillations de la rotation de la Terre.

L'étape suivante est de se demander si le Soleil lui-même se déplace. La réponse est oui. Localement, il se déplace avec une vitesse de 19,4 km/s en direction de la constellation d'Hercule. Cela fut démontré par William Herschel en 1783. Mais globalement, le mouvement est beaucoup plus captivant. Le diamètre de la Galaxie fait au moins 100 000 années-lumière, et nous sommes situés à 26 000 années-lumière du bulbe central. (Ce

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

fait est connu depuis 1918, le centre de la galaxie est situé dans la direction du Sagittaire.) À notre emplacement, la Galaxie a une épaisseur de 1 300 années-lumière et, en ce mo-
Réf. 79 ment, nous sommes 68 années-lumière « au-dessus » du plan central. Le Soleil, et avec lui le Système solaire tout entier, met environ 225 millions d'années pour faire une révolution autour du centre galactique, sa vitesse orbitale étant approximativement 220 km/s. Il semble que le Soleil continuera de s'éloigner du plan de la Galaxie jusqu'à ce qu'il soit à peu près à 250 années-lumière au-dessus de celui-ci, puis amorcera un mouvement opposé, comme indiqué sur la Figure 56. La période d'oscillation est estimée à approximativement 60 millions d'années, et a été invoquée comme étant le processus de l'extinction massive de la vie animale sur Terre, probablement à cause de quelque nuage de matière rencontré sur notre itinéraire. Ce point est encore largement débattu dans la communauté des chercheurs.

Nous tournons autour du centre de la Galaxie parce que la formation des galaxies, comme celle du Système solaire, se produit toujours dans un tourbillonnement de matière. D'ailleurs, pouvez-vous confirmer à partir de vos propres observations que notre
Défi 165 s Galaxie tourne sur elle-même ?

Enfin, nous pouvons nous demander si la Galaxie elle-même se déplace. Son mouvement peut être observé en réalité parce qu'il est possible d'évaluer le mouvement du Soleil à travers l'univers, en le définissant comme étant son mouvement par rapport au
Réf. 80 rayonnement de fond cosmique. Cette valeur a été mesurée comme étant de 370 km/s. (La vitesse de la *Terre* par rapport au rayonnement de fond cosmique dépend bien sûr des saisons.) Cette valeur est une combinaison du mouvement du Soleil autour du centre de la Galaxie et du mouvement de la Galaxie elle-même. Cette dernière est provoquée par l'attraction gravitationnelle des galaxies les plus proches dans notre groupe local de galaxies*.

En résumé, la Terre se déplace réellement, et elle le fait d'une manière quelque peu complexe. Comme Henri Poincaré le dirait, si nous sommes en un lieu donné aujourd'hui, par exemple le Panthéon à Paris, et que nous revenons au même endroit demain à la même heure, nous serons en réalité 31 millions de kilomètres plus loin. Cette description des choses pourrait rendre les voyages dans le temps extrêmement ardus dans le cas où ils seraient possibles (ce qui n'est pas vrai), toutes les fois que vous rentreriez d'un voyage dans le passé, vous devriez viser extrêmement juste pour retrouver l'ancienne position !

La rotation est-elle relative ?

Lorsque nous nous retournons brutalement, nos bras se soulèvent. Pourquoi en est-il ainsi ? Comment notre corps peut-il percevoir le fait que nous sommes en rotation ou non ? Il y a deux interprétations possibles. La première approche, promue par Newton, est de dire que l'espace est absolu : à chaque fois que nous tournons par rapport à cet espace, le système réagit. L'autre réponse est de remarquer qu'à chaque fois que les bras se soulèvent les astres tournent aussi, et exactement de la même manière. En d'autres termes, notre corps détecterait la rotation parce que nous nous déplaçons par rapport à la distribution moyenne de la masse dans l'espace.

* C'est la fin subite de notre ascension. Remarquez que l'expansion de l'univers, qui sera étudiée plus tard, ne produit aucun mouvement.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'argument le plus souvent cité par rapport à cette discussion est attribuable à Newton. À la place des bras, il examina le cas de l'eau dans un seau en rotation. Comme d'habitude pour les discussions philosophiques, la réponse de Newton fut guidée par son comportement mystique déclenché par la mort de son père quelques années auparavant. Newton voyait l'espace absolu comme un dogme religieux et n'était pas même capable d'imaginer une alternative. Newton pensait donc que la rotation était un concept absolu. La plupart des scientifiques contemporains ont moins de préjugés et sont plus raisonnés que Newton. Ainsi, le consensus moderne formule que les effets de la rotation sont dus à la distribution de masse dans l'univers : la rotation est relative. Cependant, soyons honnêtes : cette question ne peut être élucidée par la physique galiléenne. Nous aurons besoin de la relativité générale.

Curiosités et défis amusants sur le mouvement quotidien

> « C'est un fait mathématique établi que la projection de ce caillou depuis ma main modifie la position du centre de gravité du cosmos. »
> Thomas Carlyle*, *Sartor Resartus III*.

Voici quelques questions à méditer au sujet du mouvement.

* *

Une automobile roulant à une certaine vitesse donnée consomme 7 litres d'essence pour
Défi 167 s 100 km. Quelle est la résistance combinée de l'air et de la route sur la roue ? (Supposez que le moteur possède un rendement de 25 %.)

* *

Lors d'un voyage en train, vous pouvez tester la déclaration de Galilée sur la relativité quotidienne du mouvement. Fermez vos yeux et demandez à quelqu'un de vous faire tourner sur vous-même plusieurs fois : êtes-vous capable de dire dans quelle direction le
Défi 168 e train est en marche ?

* *

Un train commence à rouler à une vitesse constante de 10 m/s entre deux villes A et B, séparées de 36 km. Le train prendra une heure pour effectuer le trajet. En même temps que le train démarre, une colombe rapide commence à voler de A jusqu'à B, à 20 m/s. Étant plus rapide que le train, la colombe arrive la première en B. Elle se met alors à voler en direction de A. Lorsqu'elle rencontre le train, elle fait encore demi-tour vers la ville B. Elle vole en faisant des allers-retours jusqu'à ce que le train parvienne en B. Quelle
Défi 169 e distance la colombe a-t-elle parcourue ?

* *

Une bonne balance de salle de bains, utilisée pour déterminer le poids d'une personne, n'indique pas un poids constant lorsque vous vous appuyez dessus puis que vous demeu-
Défi 170 s rez immobile. Pourquoi en est-il ainsi ?

Défi 166 s * Thomas Carlyle (1797–1881). Êtes-vous d'accord avec la citation ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

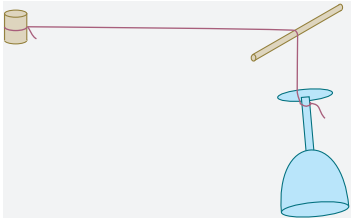


FIGURE 57 N'est-il pas risqué de lâcher le bouchon ?

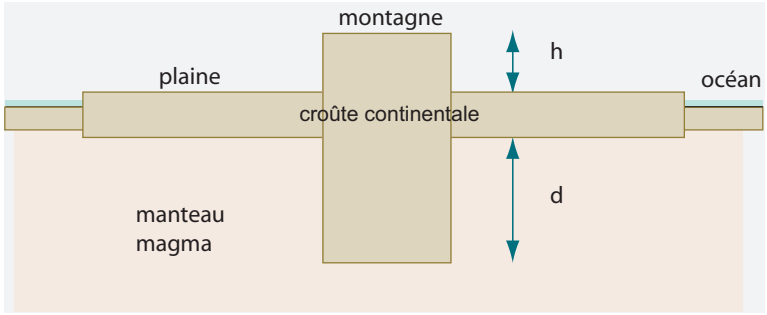


FIGURE 58 Un modèle simple pour les continents et les montagnes.

* *

Un bouchon est fixé à une mince ficelle d'un mètre de long. La ficelle passe sur une longue tige tenue horizontalement, et un verre à pied est attaché à l'autre bout. Si vous laissez tomber le bouchon comme sur la Figure 57, rien ne se brise. Pourquoi ? Que se
Défi 171 s passe-t-il ?

* *

En 1901, Duncan MacDougalls, un médecin, mesura le poids de personnes en train de mourir, dans le but de déterminer si la mort provoque une variation de la masse. Il releva une modification subite d'environ 20 g au moment du décès, avec de grandes variations
Défi 172 s d'un individu à l'autre. Il attribua cela à l'âme. Cette explication est-elle satisfaisante ? (Si vous en connaissez une plus satisfaisante, publiez-la !)

* *

La croûte terrestre est moins dense (2,7 kg/l) que le manteau terrestre (3,1 kg/l) et flotte sur celui-ci. Par conséquent, la croûte plus légère située sous une crête montagneuse doit être bien plus profonde que celle située sous une plaine. Si une montagne s'élève à 1 km
Défi 173 s au-dessus de la plaine, à quelle profondeur doit être située la croûte sous elle ? Le modèle simple en blocs montré sur la Figure 58 convient assez bien. D'abord il explique pourquoi, à proximité des montagnes, des mesures de la variation de la chute libre par rapport à la ligne verticale conduisent à des valeurs bien plus petites que celles attendues sans une croûte profonde. De plus, des mesures sonores ont directement confirmé que la croûte continentale est en réalité plus épaisse sous les montagnes.

* *

Posez en équilibre un stylo verticalement (la pointe vers le haut !) sur une feuille de pa-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

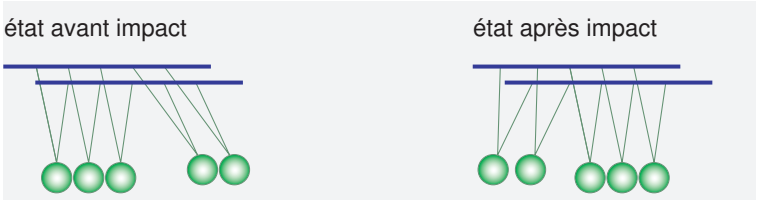


FIGURE 59 Un jouet bien connu.

pier posée près du rebord d'une table. Comment pouvez-vous retirer la feuille sans faire
Défi 174 e tomber le stylo ?

* *

Prenez un empilement de pièces de monnaie. Nous pouvons faire sortir les pièces, en commençant par celle située tout en bas de la pile, en projetant une autre pièce sur la surface de la table. Cette méthode nous aide également à visualiser la conservation bidi-
Défi 175 e mensionnelle de la quantité de mouvement.

* *

Début 2004, deux hommes et une femme ont gagné 1,2 million £ en une soirée seulement dans un casino de Londres. Ils ont réussi en appliquant la formule de la mécanique galiléenne. Ils utilisèrent la méthode initiée par plusieurs physiciens dans les années 1950 qui avaient construit divers calculateurs minuscules, lesquels pouvaient prédire le résultat
Réf. 81 d'une bille de jeu de roulette à partir de la vitesse initiale communiquée par le croupier. Dans le cas de nos Britanniques, le groupe ajouta un scanner laser à un smartphone (un téléphone mobile couplé à un PDA [N.D.T.]) qui mesurait la trajectoire de la bille de roulette et prédisait les numéros sur lesquels elle devait s'immobiliser. De cette façon, ils passaient de 1 chance sur 37 de gagner à environ 1 chance sur 6. Après six mois d'investigations, Scotland Yard statua qu'ils pouvaient conserver l'argent qu'ils avaient gagné.

* *

Un aller-retour par avion – à partir d'un point A jusqu'à un point B puis retour au point
Défi 176 e A – est-il plus rapide si le vent souffle, ou pas ?

* *

Le jouet de la Figure 59 (un *pendule de Newton* ou « Newton's cradle » en anglais [N.D.T.]) soulève un comportement intéressant : lorsqu'un certain nombre de sphères sont soulevées puis relâchées pour frapper celles qui sont au repos, le même nombre de sphères se détache de l'autre côté, tandis que les sphères précédemment relâchées demeurent immobiles. À première vue, tout cela semble découler de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Cependant, la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement ne fournit que deux équations, ce qui s'avère insuffisant pour expliquer ou déterminer le comportement de cinq sphères. Alors pourquoi les sphères se comportent-elles de cette manière ? Et pourquoi oscillent-elles toutes en phase après
Défi 177 d qu'un temps suffisamment long s'est écoulé ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

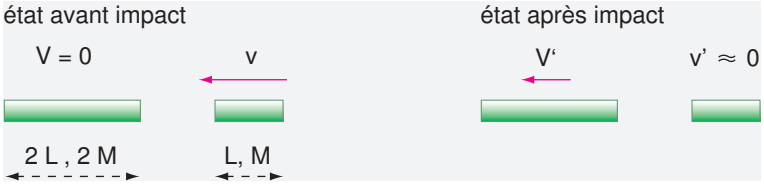


FIGURE 60 Une collision élastique qui semble ne pas respecter la conservation de l'énergie.

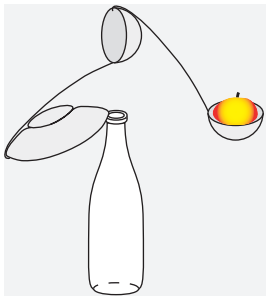


FIGURE 61 Le centre de masse détermine la stabilité.

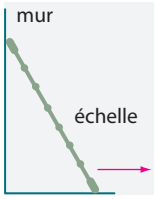


FIGURE 62 Comment l'échelle tombe-t-elle ?

* *

Un effet surprenant est employé dans les outils domestiques tels que les perceuses à percussion. Nous nous rappelons que lorsqu'une petite balle frappe élastiquement une plus grosse au repos, les deux balles se déplacent après le choc, et la plus petite se déplace évi-
Réf. 83 demment plus vite que la plus grosse. Malgré cette assertion, lorsqu'un cylindre court frappe un autre plus long de même diamètre et de même matière, mais d'une longueur qui est un multiple *entier* de celle du cylindre court, quelque chose de stupéfiant se produit. Après le choc, le petit cylindre reste pratiquement au repos tandis que le plus grand se déplace, tel qu'indiqué sur la Figure 60. Quand bien même la collision est élastique, la conservation de l'énergie semble ne pas être vérifiée dans cette situation. (En réalité c'est pour cette raison que les démonstrations des collisions élastiques sont toujours effectuées
Défi 178 d avec des sphères à l'école.) Qu'arrive-t-il à l'énergie ?

* *

Un mur est-il plus fortement secoué lorsqu'il est frappé avec une balle qui rebondit sur
Défi 179 s lui ou lorsqu'il est frappé avec une balle qui reste collée dessus ?

* *

Les femmes au foyer savent comment déboucher une bouteille de vin en utilisant une
Défi 180 s étoffe. Pouvez-vous imaginer comment ? Elles savent également extraire le bouchon avec l'étoffe si celui-ci est tombé à l'intérieur de la bouteille. Comment ?

* *

Le problème de l'échelle qui glisse, schématisé sur la Figure 62, requiert une analyse

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

détaillée du mouvement de l'échelle dans le temps. Le problème est plus difficile qu'il n'y paraît, même si le frottement est négligé. Pouvez-vous dire si l'extrémité inférieure touche toujours le plancher ?

Défi 181 pe

* *

Réf. 84 Une mouche commune posée sur la poupe d'un bateau de 30 000 tonnes et de 100 m de longueur l'incline d'une distance plus petite que le diamètre d'un atome. Aujourd'hui, des distances si petites sont facilement mesurées. Pouvez-vous penser à au moins deux méthodes pour cela, dont une qui ne devrait pas coûter plus de 2 000 euros ?

Défi 182 s

* *

Le degré d'accélération qu'un homme peut supporter dépend de la durée pendant laquelle il est soumis à celle-ci. Pour un dixième de seconde, une accélération de 30 g= 300 m/s^2, telle celle produite par un siège éjectable dans un avion, est acceptable. (Il paraît que le record d'accélération qu'un homme a pu supporter est d'environ 80 g = 800 m/s^2.) Mais de manière empirique on affirme que des accélérations de 15 g = 150 m/s^2 ou plus sont fatales.

* *

Les plus fortes accélérations *microscopiques* sont observées dans les collisions de particules, où nous obtenons des valeurs allant jusqu'à 10^{35} m/s^2. Les plus fortes accélérations *macroscopiques* se produisent probablement dans les effondrements internes des *supernovae*, des étoiles en explosion qui peuvent être lumineuses au point d'être visibles dans le ciel en plein jour. Un équivalent sur Terre est l'intérieur des bulles qui implosent dans des liquides, un processus nommé *cavitation*. La cavitation produit souvent de la lumière, un effet découvert par Frenzel et Schulte en 1934 et appelé *sonoluminescence*. (Voir la Figure 63.) Elle se manifeste de façon frappante quand des bulles d'air dans l'eau sont étendues puis contractées par des haut-parleurs sous-marins à environ 30 kHz et elle autorise des mesures précises du mouvement des bulles. À un certain seuil d'intensité, le rayon de la bulle varie à la vitesse de 1500 m/s dans un espace réduit de quelques µm, donnant une accélération de plusieurs fois 10^{11} m/s^2.

Réf. 85

* *

Si un pistolet situé à l'équateur tire une balle verticalement, où la balle va-t-elle retomber ?

Défi 183 s

* *

Pourquoi la plupart des bases de lancement de fusées sont-elles aussi rapprochées que possible de l'équateur ?

Défi 184 s

* *

Le voyage à travers l'espace interplanétaire serait-il sans risque pour la santé ? Les gens fantasment souvent à propos des longues excursions à travers le cosmos. Les expériences ont montré que, lors de voyages de longue durée, les rayons cosmiques, l'affaiblissement de la structure osseuse et la dégénérescence musculaire sont les plus grands périls. Un grand nombre d'experts médicaux s'interrogent sur la viabilité du voyage spatial pro-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 63 Observation de la sonoluminescence et schéma de l'installation expérimentale.

longé, d'une durée de plus de deux années. D'autres dangers sont les coups de soleil brusques, du moins à proximité du Soleil, et l'exposition au vide spatial. Jusqu'à présent
Réf. 86 un seul homme a fait l'expérience du vide sans protection. Il perdit conscience au bout de 14 secondes, mais fut sain et sauf.

* *

Comment peut-on comparer l'énergie cinétique d'une balle de fusil à celle d'un homme
Défi 185 s qui court ?

* *

Dans quelle direction une flamme s'incline-t-elle si elle brûle à l'intérieur d'une fiole
Défi 186 s posée sur une platine en rotation ?

* *

Une balle de ping-pong est attachée à une pierre par une ficelle, et le tout est mis sous l'eau dans un récipient. L'installation est dessinée sur la Figure 64. Maintenant, le ré-
Défi 187 s cipient est accéléré horizontalement. Dans quelle direction la balle se déplace-t-elle ? Qu'en déduisez-vous pour un récipient au repos ?

* *

Qu'arrive-t-il à la taille d'un œuf lorsque nous le disposons dans une fiole de vinaigre
Défi 188 s pendant plusieurs jours ?

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'accélération centrifuge existe-t-elle ? La plupart des étudiants d'université ont eu cette stupéfaction d'entendre, durant un cours, un professeur leur annoncer qu'il s'agit d'une notion « imaginaire », contredisant ainsi l'expérience que nous avons tous eue en conduisant un véhicule dans un virage. Demandez simplement au professeur qui affirme cela de vous définir l'« existence ». (La définition que les physiciens utilisent généralement est donnée dans l'Intermède qui achève cette partie.) Vérifiez alors si la définition s'applique à ce terme et essayez vous-même de faire une expérience de pensée.

Page ??
Défi 189 s

* *

La rotation cache une surprise pour celui qui l'étudie attentivement. Le moment cinétique est une quantité qui possède une grandeur et une direction. Cependant, ce n'est pas un vecteur, comme nous le montre n'importe quel miroir. Le moment cinétique d'un corps qui tourne dans un plan parallèle au miroir agit d'une manière différente d'une flèche commune : son image dans le miroir n'est pas réfléchie s'il pointe dans la direction du miroir ! Vous pouvez aisément vérifier cela vous-même. Pour cette raison, le moment cinétique est désigné par le terme de *pseudo-vecteur*. Cette circonstance ne constitue pas une entrave importante en physique classique, mais nous devrons garder cela à l'esprit pour des occasions futures.

Défi 190 e

* *

Quelle est la meilleure manière de transporter un certain nombre de tasses pleines de café ou de thé tout en évitant de renverser du précieux liquide ?

Défi 191 s

* *

La Lune fuit la Terre à raison de 3,8 cm par an, à cause du frottement. Pouvez-vous dévoiler le mécanisme qui en est responsable ?

Défi 192 s

* *

Quelle est l'amplitude d'oscillation d'un pendule qui se balance de telle manière que les valeurs absolues de son accélération à son point le plus bas et à son point de rebroussement soient égales ?

Défi 193 pe

* *

Pouvez-vous confirmer que la valeur de l'accélération d'une goutte d'eau chutant à travers de la vapeur est $g/7$?

Défi 194 pe

* *

Que sont les tremblements de terre ? Les *tremblements de terre* sont des exemples de grande ampleur du même processus qui fait qu'une porte grince. Les plaques continentales correspondent aux surfaces métalliques situées au niveau des gonds de la porte.

Les tremblements de terre peuvent être assimilés à des sources d'énergie. L'échelle de Richter constitue une évaluation immédiate de leur énergie. La *magnitude de Richter* M_s d'un séisme, un simple nombre, est définie à partir de son énergie E en joule via la relation

$$M_s = \frac{\log(E/1\mathrm{J}) - 4,8}{1,5} \,. \tag{28}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

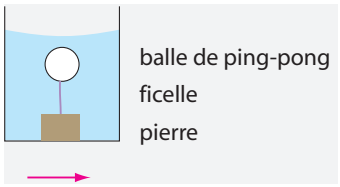


FIGURE 64 Comment la balle se déplace-t-elle quand le récipient est accéléré ?

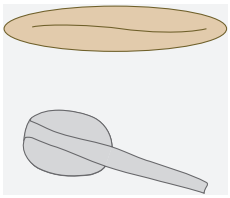


FIGURE 65 La célèbre pierre celtique et une variante fabriquée avec une cuillère.

Les nombres arbitraires qui apparaissent dans l'expression ont été choisis de façon à rapprocher le plus possible les valeurs des séismes de l'ancienne échelle de Mercalli (maintenant dénommée EMS98), purement qualitative, qui échelonne l'intensité d'un séisme. Toutefois, ce n'est pas complètement possible : les instruments les plus sensibles aujourd'hui détectent des séismes de magnitude −3. La plus grande valeur jamais mesurée fut une magnitude de 10 sur l'échelle de Richter, au Chili en 1960. Des magnitudes supé-
Défi 195 s rieures à 12 sont probablement impossibles. (Pouvez-vous montrer pourquoi ?)

* *

La Figure 65 montre l'intéressante *pierre celtique*, une pierre qui commence à tourner sur
Réf. 83 une surface plane dès qu'on la fait osciller. La taille peut varier de quelques centimètres à quelques mètres. Nous pouvons réaliser une variante élémentaire de ce surprenant outil simplement en pliant le manche d'une cuillère, pourvu que la pliure ne soit pas parfaitement symétrique. La rotation se fait toujours dans le même sens. Si la pierre est mise en rotation dans la mauvaise direction, au bout d'un moment elle s'immobilise et recom-
Défi 196 d mence à tourner dans l'autre sens ! Pouvez-vous expliquer cet effet ?

* *

Quel est le mouvement du point de la surface terrestre qui a le Soleil à son zénith (c'est-à-dire verticalement au-dessus de lui) lorsqu'il est observé sur une carte de la Terre pen-
Défi 197 pe dant une journée, puis jour après jour ?

* *

Le moment d'inertie d'un corps dépend de la forme du corps en question. Généralement, le moment cinétique et la vitesse angulaire ne pointent pas dans la même direction.
Défi 198 s Pouvez-vous entériner ce fait avec un exemple ?

* *

Peut-il se produire qu'une antenne parabolique d'un satellite géostationnaire de télévi-
Défi 199 s sion focalise la lumière du Soleil sur le récepteur ?

* *

Pourquoi est-il ardu de mettre à feu une fusée depuis un avion dans la direction opposée
Défi 200 s du mouvement de l'avion ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

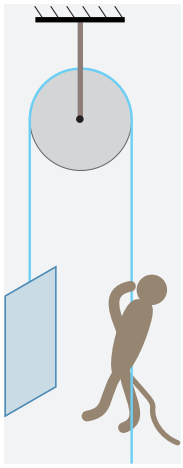


FIGURE 66 Comment le singe va-t-il se déplacer ?

* *

Prenez deux sphères creuses de même poids, de même taille et peintes toutes les deux avec la même couleur. L'une d'entre elles est faite de cuivre, l'autre est en aluminium. Bien évidemment, elles tombent avec la même vitesse et la même accélération. Que se
Défi 201 pe passe-t-il si elles roulent toutes les deux de haut en bas sur un plan incliné ?

* *

Un singe est suspendu à une corde. La corde passe par-dessus la roue d'une poulie et est liée à une masse de poids égal suspendue à l'autre extrémité, tel qu'indiqué sur la Figure 66. La corde et la roue sont sans masse et dénuées de tout frottement. Que se
Défi 202 s passe-t-il quand le singe grimpe vers le haut ?

* *

Défi 203 pe Quelle est la figure formée par une corde lors du saut à la corde ?

* *

Comment pouvez-vous mesurer la vitesse d'une balle de fusil avec une échelle et une
Défi 204 s règle graduée seulement ?

* *

Pourquoi un fusil peut-il faire un trou dans une porte mais ne peut pas la pousser pour
Défi 205 e l'ouvrir, ce qui est parfaitement opposé à ce qu'un doigt peut effectuer ?

* *

Un skieur nautique peut-il se déplacer avec une vitesse plus grande que celle du bateau
Défi 206 s qui le tire ?

* *

Prenez deux boîtes de conserve de même taille et de même poids, une pleine de raviolis
Défi 207 e et l'autre pleine de petits pois. Laquelle roule plus rapidement sur un plan incliné ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Défi 208 s Quel est le moment d'inertie d'une sphère homogène ?

* *

Le moment d'inertie est déterminé par les valeurs des composantes de ses trois axes principaux. Celles-ci sont toutes identiques pour une sphère ou pour un cube. Cela signifie-t-il qu'il est impossible de faire la différence entre une sphère et un cube concernant leur
Défi 209 s comportement inertiel ?

* *

Vous devez certainement connaître le « Dynabee » (une imitation du Powerball [N.D.T.]), un dispositif gyroscopique qui se tient dans la main et qui peut être accéléré à des vitesses élevées par des mouvements appropriés de la main. Comment
Défi 210 d fonctionne-t-il ?

* *

Il est possible de réaliser une toupie avec une agrafeuse métallique. Il est même possible de réaliser une de ces toupies-là en la faisant tourner sur la tête. Pouvez-vous découvrir
Défi 211 s comment ?

* *

Est-il vrai que la Lune, lorsqu'elle est dans son premier quartier dans l'hémisphère Nord,
Défi 212 s ressemble au dernier quartier de Lune dans l'hémisphère Sud ?

* *

Une confirmation splendide que la Terre est ronde peut être aperçue au coucher du Soleil si nous tournons, contrairement à nos habitudes, le dos au couchant. Dans la partie orientale de la voûte céleste, nous pouvons contempler la montée impressionnante de l'ombre de la Terre. (En réalité, des recherches attentives montrent que ce n'est pas l'ombre de la Terre, mais plutôt l'ombre de l'ionosphère.) Nous pouvons admirer une énorme tache s'élevant à travers l'horizon tout entier, ayant distinctement la forme d'un segment d'un vaste cercle.

* *

Défi 213 s À quoi ressemblerait la photographie de la Figure 67 si elle était prise à l'équateur ?

* *

La course en arrière est un sport intéressant. Les records mondiaux de courses en arrière en 2006 peuvent être consultés sur http://www.recordholders.org/en/list/backwards_running.html. Vous serez surpris de voir combien ces records sont plus
Défi 214 e élevés que votre meilleur temps individuel de course en *avant*.

* *

Puisque la Terre est ronde, il y a plusieurs chemins différents pour aller d'un point à un autre sur celle-ci en suivant la courbe d'un segment de cercle. Cela a une conséquence intéressante notamment pour les ballons de volley et pour ceux qui aiment mater les jo-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 67 Le ciel nocturne après une pose longue – au-dessus du télescope du Mauna Kea à Hawaï (Gemini).

lies filles. Prenez un ballon de volley et observez sa valve. Si vous voulez déplacer la valve par une simple rotation à une autre position, vous pouvez choisir l'axe de rotation de
Défi 215 e différentes manières. Êtes-vous d'accord avec cela ? En d'autres termes, lorsque nous regardons dans une direction donnée et que nous voulons alors regarder dans une autre direction, l'œil parvient à accomplir cette modification de différentes manières. L'option choisie par l'œil humain a déjà été étudiée par des biologistes durant le dix-huitième siècle. C'est ce que nous appelons la « *loi* » *de Listing**. Elle établit que tous les axes choisis par la nature se trouvent dans un plan unique. Pouvez-vous imaginer sa position dans
Défi 216 s l'espace ? Les hommes ont un intérêt indubitable à ce que ce mécanisme soit scrupuleusement respecté : sinon, mater les filles sur la plage pourrait provoquer l'enchevêtrement des muscles directeurs des yeux.

DES JAMBES OU DES ROUES ? – SUITE

L'accélération et la décélération des véhicules motorisés ordinaires dépassent rarement environ $1\ g = 9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$, l'accélération due à la gravité sur notre globe. Des accélérations plus importantes sont atteintes par les motos et les voitures de course grâce à l'utilisation de suspensions qui dévient le poids vers les essieux et par l'utilisation de

* Si vous souhaitez apprendre plus en détail comment la nature et l'œil y parviennent avec toute la complexité des trois dimensions, consultez les sites Web http://schorlab.berkeley.edu/vilis/whatisLL.htm et http://www.med.uwo.ca/physiology/courses/LLConsequencesWeb/ListingsLaw/perceptual2.htm.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 68 Un lézard, le basilic commun (*Basiliscus basiliscus*), courant sur l'eau, indiquant comment les jambes propulsives prennent appui sur l'eau. (© TERRA)

carénages, de telle sorte que le véhicule est poussé vers le bas avec une force plus élevée que celle due à son propre poids. Les carénages modernes sont si efficaces pour plaquer une voiture contre la piste que les voitures de course peuvent rouler à vive allure sur le plafond d'un tunnel sans tomber.

Par le truchement de pneus spéciaux, ces forces dirigées vers le bas sont transformées en prise d'adhérence. Les pneus modernes de compétition supportent des accélérations vers l'avant, vers l'arrière et sur les côtés (requises lors d'une augmentation de vitesse, lors du freinage et lors de la prise d'un virage) d'approximativement 1,1 à 1,3 fois la charge du véhicule. Les ingénieurs pensaient auparavant qu'un facteur de 1 était la limite théorique, et cette limite est encore quelquefois rencontrée dans les manuels. Mais les progrès dans la technologie des pneus, principalement dus à une compréhension plus fine de l'interface entre le pneu et la surface de la route ainsi qu'à une mise en œuvre plus astucieuse du mécanisme des boîtes de vitesses, ont permis aux ingénieurs d'atteindre ces valeurs plus élevées. Les plus fortes accélérations, autour de 4 g, sont atteintes lorsqu'une partie du pneu fond et colle à la surface. Les pneus exceptionnels conçus à cet effet sont utilisés pour les dragsters, mais les maquettes de véhicules radiocommandés de haute performance peuvent également atteindre de telles valeurs.

Comment comparer tous ces efforts à l'usage de jambes ? Les athlètes du saut en hauteur peuvent atteindre des crêtes d'accélération d'environ 2 à 4 g, les guépards plus de 3 g, les galagos (des lémuriens) jusqu'à 13 g, les criquets environ 18 g, et des puces ont été
Réf. 87 mesurées dans une accélération d'environ 135 g. L'accélération maximale connue dans le règne animal est celle de l'insecte claqueur (*Agriotes lineatus*, plus connu sous le nom de taupin [N.D.T.]), un petit insecte capable d'accélérer jusqu'à plus de 2 000 $m/s^2 = 200\ g$, à peu près autant qu'un plomb de fusil à air comprimé lorsqu'il est tiré. Les jambes sont donc des dispositifs d'accélération indubitablement plus efficaces que les roues – un guépard peut aisément dépasser n'importe quelle voiture ou moto – et l'évolution a développé les jambes, à la place de roues, pour augmenter les chances de survie d'un animal en danger. En bref, les jambes sont *plus performantes* que les roues.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 69 Un gerris ou araignée d'eau. (© Charles Lewallen)

Il existe d'autres raisons pour utiliser des jambes plutôt que des roues. (Pouvez-vous
Défi 217 s en citer quelques-unes ?) Par exemple, les jambes, contrairement aux roues, permettent de marcher sur l'eau. Le plus célèbre animal capable de réaliser cette prouesse est le *basilic* commun (*Basiliscus basiliscus*)*. Ce reptile est long d'environ 50 cm et pèse quelque 90 g. Il ressemble à un minuscule *Tyrannosaurus rex* et est capable de courir sur ses pattes arrière à la surface de l'eau. Le mouvement a été étudié en détail avec des caméras ultra-rapides et par des mesures utilisant des modèles en aluminium des pieds de l'animal. Les expériences suggèrent que le frappement du pied sur l'eau ne fournit que 25 % de
Réf. 88 la force nécessaire pour courir sur l'eau. Les 75 % restants sont apportés par une poche d'air comprimé que les basilics engendrent entre leur pied et l'eau une fois que le pied est dans l'eau. En réalité, les basilics marchent principalement sur l'air**. Il a été calculé que les hommes sont pareillement aptes à marcher sur l'eau, à condition que leur pied frappe l'eau avec une vitesse de 100 km/h en utilisant la puissance physique simultanée de 15 sprinters. Ce qui représente vraiment un exploit pour tous ceux qui ont tenté d'y parvenir.

Il existe une seconde méthode pour marcher et courir sur l'eau. Elle permet même à ses usagers de demeurer immobiles au-dessus de la surface de l'eau. C'est ce que les araignées d'eau***, des insectes de la famille des *Gerridae* d'une longueur totale allant jusqu'à 15 mm, sont capables de faire (tout comme plusieurs espèces d'araignées). Comme tous les insectes, l'araignée d'eau possède six pattes (les araignées en ont huit). L'araignée d'eau utilise les pattes arrière et avant pour glisser au-dessus de la surface, à l'aide de milliers de poils minuscules reliés à son corps. Les poils, en même temps que la tension superficielle de l'eau, empêchent l'insecte d'être mouillé. Si vous versez du shampooing sur l'eau, l'araignée d'eau coule et ne peut donc plus se déplacer. Elle utilise ses grandes pattes du milieu comme des rames pour avancer sur la surface, parvenant de cette façon à des vitesses allant jusqu'à 1 m/s. En résumé, les araignées d'eau se déplacent en fait en ramant.

Les jambes soulèvent de nombreuses questions intéressantes. Les ingénieurs savent qu'un escalier est confortable à gravir seulement si, pour chaque marche, la somme de

* Au Moyen Âge, le mot « basilic » se référait à un monstre légendaire qui était censé apparaître brièvement juste avant la fin du monde. Aujourd'hui, c'est un petit lézard d'Amérique centrale.

Réf. 89 ** Les deux méthodes utilisées par le basilic se rencontrent également dans le canoë-kayak de compétition.

*** Également appelées gerridés, et plus joliment encore « patineurs de l'eau », les araignées d'eau font en réalité partie de la famille des punaises [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

la profondeur l et du *double* de la hauteur h est une constante : $l + 2h = 0{,}63 \pm 0{,}02\,\mathrm{m}$.
Défi 218 s C'est la prétendue *formule de l'escalier*. Pourquoi s'exprime-t-elle ainsi ?

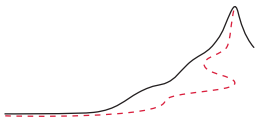
Tous les animaux possèdent un nombre *pair* de jambes. Connaissez-vous une exception ? Pourquoi n'est-ce pas le contraire ? En réalité, nous pouvons argumenter qu'aucun animal n'a moins de quatre jambes. Pourquoi en est-il ainsi ?
Défi 219 s

D'un autre côté, tous les animaux dotés de deux jambes les ont l'une près de l'autre, tandis que les systèmes dotés de roues les ont l'une derrière l'autre. Pourquoi n'est-ce pas l'inverse qui se produit ?
Défi 220 e

Les jambes fournissent également des instruments simples de mesure des distances : comptez simplement vos pas. En 2006, il fut découvert que certaines espèces de fourmis, telle *Cataglyphis fortis*, tirent profit de cette méthode. Elles peuvent en compter jusqu'à 25 000 au moins, comme Matthias Wittlinger et son équipe l'ont montré. Ces fourmis utilisent cette aptitude pour trouver l'itinéraire le plus court pour retourner à leur domicile même dans un terrain désert dépourvu de tout repère.
Réf. 90

Continuons dorénavant avec l'étude du mouvement transmis à distance, sans qu'il y ait le moindre contact.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 6

DYNAMIQUE DUE À LA GRAVITATION

> « Caddi come corpo morto cade. »
> Dante, *Inferno*, c. V, v. 142.*

La première et principale méthode dépourvue de tout contact que nous découvrons dans notre environnement pour engendrer le mouvement est la *hauteur*. Elle concerne les chutes d'eau, la neige, la pluie et les pommes qui tombent. Le fait que la hauteur ait cette propriété parce qu'il existe une interaction entre chaque corps et la Terre a constitué une des découvertes fondamentales de la physique. La *gravitation* produit une accélération le long de la ligne qui relie les centres de gravité du corps et de la Terre. Remarquez que pour faire cette déclaration il est indispensable de comprendre que la Terre est un corps, tout comme une pierre ou la Lune, que ce corps est limité et qu'il possède par conséquent un centre et une masse. De nos jours, ces assertions sont communément admises, mais elles ne sont en aucun cas évidentes d'après notre expérience quotidienne**.

Comment la gravitation varie-t-elle lorsque deux corps sont éloignés l'un de l'autre ? Les spécialistes des objets lointains sont les astronomes. Au fil des ans, ils ont réalisé une multitude de relevés sur les mouvements de la Lune et des planètes. Le plus assidu de tous fut Tycho Brahe***, qui orchestra de manière industrielle la recherche de preuves astronomiques, grâce au parrainage de son souverain. Ses mesures constituèrent le fondement de la recherche de son jeune assistant, l'astronome souabe Johannes Kepler****,

* « Je tombai comme un corps que la vie abandonne. » (Traduction de Rivarol, 1867.) Dante Alighieri (Florence 1265–Ravenne 1321), le premier grand poète de la langue italienne.

** Dans plusieurs mythes sur la création ou l'agencement du monde, tels celui de la Bible ou celui de l'Inde, la Terre n'est pas un objet, mais une entité définie de façon imprécise, par exemple une île flottante ou ceinturée par les mers avec des frontières obscures et des explications confuses sur la manière dont elle reste

Défi 221 s suspendue. Parviendrez-vous à convaincre un ami que la Terre est ronde et non pas plate ? Pouvez-vous trouver un argument différent de celui de la rotondité de l'ombre de la Terre lorsqu'elle est visible sur la Lune ?

Réf. 91 Un célèbre explorateur, Robert Peary, proclama avoir atteint le pôle Nord en 1909. (En réalité, Roald Amundsen parvint le premier à la fois au pôle Sud et au pôle Nord.) Peary affirmait y avoir pris une photo, qui fit le tour du monde, mais qui prouva en fait qu'il n'était jamais allé là-bas. Pouvez-vous concevoir

Défi 222 s comment ?

D'ailleurs, si la Terre est ronde, les sommets de deux immeubles sont plus éloignés l'un de l'autre que

Défi 223 s leur base. Cet effet peut-il être mesuré ?

*** Tycho Brahe (1546–1601), astronome danois mondialement connu, fondateur d'Uraniborg (« palais d'Uranie » ou « palais des Cieux », Uranie étant la muse de l'Astronomie), le palais dédié à l'astronomie. Il consomma à peu près 10 % du produit national brut danois pour ses recherches, qui accouchèrent du premier catalogue exhaustif d'étoiles et des premiers relevés précis de la position des planètes.

**** Johannes Kepler (Weil der Stadt 1571–Ratisbonne 1630), après avoir aidé sa mère à assurer elle-même

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Page ?? qui constitue la première description précise du mouvement planétaire. En 1684, toutes les observations sur les planètes et les projectiles furent synthétisées en une formulation étonnamment simple par le physicien anglais Robert Hooke* : chaque corps de masse M attire tout autre corps en direction de son centre avec une accélération dont la grandeur a est donnée par

$$a = G\frac{M}{r^2} \tag{29}$$

où r est la distance de centre à centre des deux corps. Elle est appelée « *loi* » *universelle de la gravitation*, ou attraction universelle, parce qu'elle s'applique de manière générale. La constante de proportionnalité G est appelée *constante gravitationnelle*, c'est une des constantes fondamentales de la nature, comme la vitesse de la lumière ou le quantum d'action. Nous en dirons un peu plus bientôt. L'effet de la gravité décroît donc avec l'augmentation de la distance : la gravité dépend de l'inverse du carré de la distance des corps en question. Si les corps sont petits comparés à la distance r, ou s'ils sont sphériques, l'expression (29) est correcte telle qu'elle est formulée. Pour des formes non sphériques, l'accélération doit être évaluée de manière séparée pour chaque partie du corps et être ajoutée à l'ensemble.

La dépendance en l'inverse du carré est fréquemment appelée « loi » de la gravitation de Newton, parce que le physicien anglais Isaac Newton démontra de façon plus élégante que Hooke qu'elle coïncide avec toutes les observations astronomiques et terrestres. Cependant, il organisa par-dessus tout une campagne de relations publiques plus efficace, Réf. 92 dans laquelle il prétendit de manière fallacieuse être l'initiateur de cette idée.

Newton publia une preuve élémentaire montrant que cette description du mouvement des astres fournit également une description exacte pour les cailloux jetés en l'air, ici-bas sur notre « Terre originelle ». Pour y parvenir, il compara l'accélération a_L de la Lune avec celle des pierres g. En ce qui concerne le rapport entre ces deux accélérations, la relation en l'inverse du carré prédit une valeur $a_L/g = R^2/d_L^2$, où R est le rayon de la Terre et d_L la distance de la Lune. La distance de la Lune peut être mesurée par triangulation, en comparant la position de la Lune sur la voûte céleste à partir de deux positions différentes sur la Terre**. Le résultat est $d_L/R = 60 \pm 3$, en fonction de la position orbitale de la Lune, prédisant de cette façon un rapport moyen $a_L/g = 3,6 \cdot 10^3$ à partir de la gravité universelle. Mais les deux accélérations peuvent également être mesurées directement. À la surface de la Terre, les pierres sont soumises à une accélération due à la gravitation d'une grandeur $g = 9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$, telle qu'elle est déterminée en mesurant le temps que les pierres mettent pour tomber d'une hauteur donnée. Pour la Lune, la définition de l'accélération, $a = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t$, dans le cas d'un mouvement circulaire – approximatif ici –

sa défense avec succès dans un procès pour sorcellerie, étudia la théologie protestante et devint professeur de mathématiques, d'astronomie et de rhétorique. Son premier ouvrage sur l'astronomie le rendit célèbre, puis il devint l'assistant de Tycho Brahe et, à la mort de son maître, fut nommé mathématicien impérial. Il fut le premier à utiliser les mathématiques dans la description des observations astronomiques et introduisit le domaine et le concept de « physique céleste ».

* Robert Hooke, (1635–1703), éminent physicien anglais et secrétaire de la Royal Society. Il écrivit également *Micrographie* (Micrographia), une superbe exploration illustrée de l'univers de l'infiniment petit.

** La première évaluation précise – mais pas la première tentative de mesure – fut accomplie en 1752 par les astronomes français Lalande et La Caille, qui mesurèrent en même temps la position de la Lune vue depuis Berlin et depuis Le Cap.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

donne $a_L = d_L(2\pi/T)^2$, où $T = 2{,}4$ Ms est le temps que la Lune met pour effectuer une révolution autour de la Terre*. La mesure du rayon de la Terre** fournit $R = 6{,}4$ Mm, de telle façon que la distance moyenne Terre-Lune est $d_L = 0{,}38$ Gm. Nous obtenons ainsi $a_L/g = 3,6{\cdot}10^3$, en accord avec la prédiction ci-dessus. Grâce à ce célèbre « calcul lunaire » nous avons ainsi montré que la propriété en l'inverse du carré de la gravitation décrit en fait à la fois le mouvement de la Lune et celui des pierres. Peut-être désirerez-vous en déduire la valeur de GM ?

Défi 227 s

À partir de l'évidence que sur Terre tout mouvement évolue *in fine* vers le repos, tandis que dans les cieux tout mouvement est éternel, Aristote et beaucoup d'autres ont conclu que le mouvement dans le monde sublunaire possède des propriétés différentes du mouvement dans le monde supralunaire. Plusieurs penseurs avaient critiqué cette distinction, notamment le philosophe français et recteur de l'Université de Paris, Jean Buridan***. Le calcul lunaire fut le plus important résultat démontrant que cette distinction était fausse. C'est la raison pour laquelle l'expression (29) est nommée « loi » *universelle* de la gravitation.

Réf. 95

Cette conclusion nous autorise à élucider une autre vieille interrogation. Pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas du ciel ? Comme il se doit, la discussion précédente a montré que la *chute* est un mouvement provoqué par la gravitation. Donc la Lune *est* effectivement en train de chuter, avec la particularité qu'au lieu de tomber *vers* la Terre elle est continuellement en train de tomber *autour* d'elle. La Figure 70 schématise cette idée. La Lune rate sans cesse la Terre****.

---

* Cela se déduit facilement en remarquant que, pour un objet en mouvement circulaire, la grandeur v de la vitesse $\mathbf{v} = \mathrm{d}\mathbf{x}/\mathrm{d}t$ est donnée par $v = 2\pi r/T$. Le tracé du vecteur $\mathbf{v}$ au cours du temps, dénommé un *hodographe*, indique qu'il se comporte exactement comme la position de l'objet. Par conséquent la grandeur a de l'accélération $\mathbf{a} = \mathrm{d}\mathbf{v}/\mathrm{d}t$ est donnée par l'expression associée, à savoir $a = 2\pi v/T$.

Défi 224 s

** C'est le nombre le plus difficile à évaluer par soi-même. Le truc le plus surprenant pour déterminer la taille de la Terre est le suivant : observez un coucher de Soleil depuis le jardin d'une propriété, avec un chronomètre à la main. Lorsque le dernier rayon du Soleil disparaît, enclenchez le chronomètre et grimpez bien vite les étages de la maison. Là, le Soleil est toujours visible. Arrêtez le chronomètre quand le Soleil disparaît à nouveau et notez le temps t. Mesurez la hauteur h entre les deux positions de l'œil lorsque le Soleil était observé. Le rayon R de la Terre est alors donné par $R = k\,h/t^2$, avec $k = 378 \cdot 10^6$ s^2.

Réf. 93

Défi 225 pe

Il existe également une manière simple pour mesurer la distance de la Lune, une fois que la taille de la Terre est connue. Prenez une photographie de la Lune lorsqu'elle est haute dans le ciel, et appelez θ son angle par rapport au zénith, c'est-à-dire par rapport à la verticale. Prenez une autre photo de la Lune quelques heures plus tard, lorsqu'elle est juste au-dessus de l'horizon. Sur cette image, contrairement à une illusion d'optique commune, la Lune est plus petite, parce qu'elle est plus éloignée. La raison en devient immédiatement claire en utilisant un croquis. Si q est le rapport entre les deux diamètres angulaires, la distance Terre-Lune d_L est donnée par la relation $d_L^2 = R^2 + [2Rq\cos\theta/(1-q^2)]^2$. Amusez-vous à dériver celle-ci à partir du croquis.

Réf. 94

Page 53

Défi 226 pe

Une autre possibilité est de déterminer la taille de la Lune en comparant celle-ci à la taille de l'ombre de la Terre pendant une éclipse. La distance de la Lune est alors déduite de sa taille angulaire, environ 0,5°.

*** Jean Buridan (v. 1295 à v. 1366) fut également un des premiers penseurs modernes à faire l'hypothèse de la rotation de la Terre autour d'un axe.

**** Une autre façon d'exprimer cela est d'utiliser la réponse du physicien hollandais Christiaan Huygens (1629–1695) : la Lune ne tombe pas du ciel à cause de l'accélération centrifuge. Tel qu'il est expliqué à la page 111, de nos jours cette interprétation ne recueille pas la faveur de la plupart des universités.

Réf. 96

Il existe un admirable problème en rapport avec la partie gauche de la figure : quels points sur la surface de la Terre peuvent être touchés en tirant une balle depuis une montagne ? Et quels points peuvent être touchés en tirant horizontalement ?

Défi 228 d

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 70 Le point de vue d'un physicien et celui d'un artiste concernant la chute de la Lune : un schéma de Christiaan Huygens (l'échelle n'est pas respectée) et une statue en marbre d'Auguste Rodin.

La gravité universelle explique aussi pourquoi la Terre et la plupart des planètes sont (approximativement) sphériques. Puisque la gravité décroît avec l'augmentation de la distance, un corps liquide dans l'espace essaiera toujours de se rassembler sous une forme sphérique. Vue à grande échelle, la Terre est en fait liquide. Nous savons également que la Terre est en train de se refroidir – c'est la raison pour laquelle la croûte et les continents se sont formés. La sphéricité des objets solides plus petits rencontrés dans l'espace, comme la Lune, implique donc qu'ils étaient liquides en des temps reculés.

Propriétés de la gravitation

La gravitation implique que la trajectoire d'une pierre ne décrive pas une parabole, comme il fut déclaré au début, mais réellement une ellipse autour du centre de la Terre. C'est pour exactement la même raison que les planètes se déplacent le long d'ellipses autour du soleil. Êtes-vous capable de valider cette affirmation ?

Défi 229 pe

La gravitation universelle nous permet de résoudre une énigme. La valeur bizarre de l'accélération $g = 9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$ que nous avions rencontrée dans l'équation (4) est finalement due à la relation

$$g = GM_{\mathrm{Terre}}/R^2_{\mathrm{Terre}} \,. \tag{30}$$

Cette équation peut être devinée à partir de l'équation (29) en considérant que la Terre est sphérique. L'accélération usuelle g de la gravité est donc une conséquence de la taille de la Terre, de sa masse et de la valeur de la constante universelle de la gravitation G. Certes, la valeur de g est presque constante à la surface de la Terre parce que celle-ci est presque une sphère. L'expression (30) explique également pourquoi g s'amenuise au fur et à mesure que nous nous élevons au-dessus de la Terre, et les écarts de la forme de la Terre par rapport à la sphéricité explicitent pourquoi g est différent aux pôles et plus élevé sur un plateau. (Que serait-il sur la Lune ? Sur Mars ? Sur Jupiter ?)

Défi 230 s

D'ailleurs, il est possible d'inventer une machine simple, autre qu'un Yo-Yo, qui diminue l'accélération effective de la gravité d'une certaine quantité connue, nous permettant ainsi de mesurer sa valeur plus facilement. Pouvez-vous imaginer laquelle ?

Défi 231 s

Remarquez que 9,8 est approché par π^2. Ce n'est *pas* une coïncidence : le mètre a été fixé de telle manière que cela soit juste. La période T d'un pendule en oscillation,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

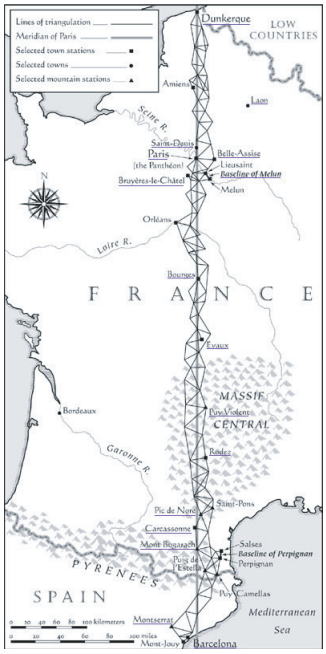


FIGURE 71 Les mesures qui conduisirent à la définition du mètre. (© Ken Alder)

Défi 232 s c'est-à-dire qui se balance d'un côté à l'autre, est donnée par*

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\ , \tag{31}$$

où l est la longueur du pendule et g est l'accélération gravitationnelle. (Le pendule est considéré comme étant constitué d'une masse fixée à un fil de poids négligeable.) La durée d'oscillation d'un pendule ne dépend que de la longueur du fil et de la planète sur laquelle il est situé. Si le mètre avait été défini de telle façon que $T/2 = 1\,\mathrm{s}$, la valeur de l'accélération ordinaire g aurait été exactement $\pi^2\ \mathrm{m/s^2}$. Ce fut la première suggestion pour la définition du mètre, faite en 1673 par Huygens et renouvelée en 1790 par Talleyrand, mais qui fut rejetée par la conférence qui avait défini le mètre en raison des variations dans la valeur de g selon la position géographique et des variations induites par la température sur la longueur d'un pendule, qui occasionnent des erreurs trop importantes pour produire une définition d'une précision suffisante.

Défi 234 e

En fin de compte, la suggestion fut faite de définir le mètre comme $1/40\,000\,000^e$ de la circonférence de la Terre en passant par les pôles, ce qui est appelé un *méridien*. Cette

* La formule (31) est remarquable principalement par tout ce qui n'apparaît *pas*. La période d'un pendule ne dépend *pas* de la masse du corps en oscillation. De plus, la période d'un pendule ne dépend *pas* de l'amplitude. (C'est vrai tant que l'angle d'oscillation est inférieur à environ 15°.) Galilée découvrit cela comme un apprenti, en observant un lustre suspendu au bout d'une longue corde sous le dôme de Pise. En utilisant son pouls comme un métronome, il trouva que, même si l'amplitude du balancement était de plus en plus petite, le temps mis pour chaque oscillation restait la même.

Une jambe se déplace aussi comme un pendule lorsque nous marchons normalement. Alors pourquoi les individus de grande taille ont-ils tendance à marcher plus vite ?

Défi 233 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

proposition était à peu près identique à celle du pendule – mais beaucoup plus précise. La définition du mètre par le méridien fut alors adoptée par l'Assemblée nationale en France le 26 mars 1791, selon la formule consacrée que « un méridien passe sous les pieds de chaque être humain, et tous les méridiens sont égaux ». (Néanmoins, la distance de
Réf. 97 l'équateur aux pôles n'est pas exactement de 10 Mm. C'est une étrange histoire. Un des deux géographes qui déterminèrent la taille du premier mètre étalon fut malhonnête. Les données qu'il avait fournies pour ses relevés – selon la méthode générale indiquée sur la Figure 71 – étaient inventées de toutes pièces. Ainsi, le premier mètre étalon officiel à Paris était plus court qu'il aurait dû l'être.)

Mais nous pouvons encore nous poser la question : pourquoi la Terre a-t-elle la masse et la taille qu'elle a ? Et pourquoi G a-t-il la valeur qu'il a ? La première question requiert la connaissance de l'histoire du Système solaire, elle est toujours sans réponse et reste un domaine actif de la recherche. La seconde question est entrevue dans l'Annexe B.

Si tous les objets s'attirent mutuellement, il devrait en être de même pour les objets de notre vie quotidienne. La gravité doit aussi fonctionner *à petite échelle*. C'est bien le cas, mais les effets sont si petits que ce n'est que longtemps après qu'ils eurent été prédits par la gravité universelle qu'ils purent être mesurés. Mesurer cet effet permet de déterminer la constante gravitationnelle G.

Remarquez que mesurer la constante gravitationnelle G est également la seule manière de déterminer la masse de la *Terre*. Le premier à le faire, en 1798, fut le physicien anglais Henry Cavendish : il utilisa le dispositif, les idées et la méthode de John Michell qui décéda alors qu'il tentait de réaliser l'expérience. Michell et Cavendish* nommèrent cet objectif et le résultat de leurs expériences la « pesée de la Terre ». Êtes-vous capable d'imaDéfi 235 s giner comment ils ont procédé ? La valeur issue des expérimentations récentes donne

$$G = 6{,}7 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2} = 6{,}7 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3/kg\,s^2}\ . \tag{32}$$

L'expérience de Cavendish était donc la première à confirmer que la gravité fonctionnait aussi à petite échelle.

Par exemple, deux individus moyens séparés de 1 m ressentent une accélération l'un vers l'autre qui est plus petite que celle exercée par une mouche commune lorsqu'elle
Défi 236 s se pose sur la peau. Donc nous faisons fi, habituellement, de l'attraction entre les personnes. Lorsque nous en tenons compte, c'est pour une raison beaucoup plus puissante. Cette simple évaluation prouve donc que la gravitation ne peut pas être la véritable cause qui fait que les gens tombent amoureux, et que l'attirance sexuelle ne trouve pas son origine dans la gravitation mais dans une source différente. Les fondements de cette autre interaction, l'amour, seront étudiés plus tard dans notre promenade : elle est appelée l'*électromagnétisme*.

Mais la gravité révèle bien d'autres propriétés plus intéressantes. Les effets de la gravitation peuvent aussi être décrits par une autre observable, à savoir le *potentiel (gravitationnel)* φ. Nous avons alors la relation simple que l'accélération est donnée par le *gradient*

* Henry Cavendish (1731–1810) fut un des grands génies de la physique. Riche et solitaire, il découvrit un grand nombre de lois de la nature, mais ne les publia jamais. S'il l'avait fait, son nom serait bien plus connu.
John Michell (1724–1793) était prêtre catholique, géologue et astronome amateur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

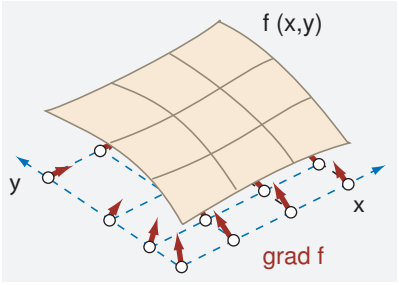


FIGURE 72 Le potentiel et le gradient.

du potentiel

$$\mathbf{a} = -\nabla\varphi \qquad \text{ou} \qquad \mathbf{a} = -\text{grad}\,\varphi\ . \tag{33}$$

Le gradient est uniquement un terme savant pour définir la « direction dans laquelle la pente est la plus importante ». Il est défini pour chaque point d'une inclinaison, il est grand pour une pente abrupte et petit pour une peu prononcée. Il pointe dans la direction de la montée la plus inclinée, comme indiqué sur la Figure 72. Le gradient est noté ∇, prononcez « nabla », et est mathématiquement défini comme étant le vecteur $\nabla\varphi = (\partial\varphi/\partial x, \partial\varphi/\partial y, \partial\varphi/\partial z) = \text{grad}\,\varphi$. Le signe négatif dans (33) est introduit par convention, dans le but d'obtenir des valeurs de potentiel plus élevées pour des altitudes plus grandes*. Pour un corps ponctuel ou sphérique de masse M, le potentiel φ est

$$\varphi = -G\frac{M}{r}\ . \tag{34}$$

Un potentiel simplifie considérablement la description du mouvement, puisqu'un potentiel est additif : en se donnant le potentiel d'une particule ponctuelle, nous pouvons calculer le potentiel et donc le mouvement autour de n'importe quel autre objet de forme irrégulière**.

* En deux dimensions ou plus, les pentes sont notées $\partial\varphi/\partial z$ – où ∂ est toujours prononcé « d » – parce que dans ces cas l'expression $d\varphi/dz$ possède une signification légèrement différente. Les détails de ceci dépassent le cadre de cette excursion.

** D'autre part, pour un corps étendu quelconque, le potentiel est établi en exigeant que la *divergence* de son gradient soit donnée par la masse (ou la charge) par unité de volume multipliée par une certaine constante de proportionnalité. Plus concrètement, nous avons

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \tag{35}$$

où $\rho = \rho(\mathbf{x}, t)$ est la masse volumique du corps et l'opérateur Δ, prononcez « delta », est défini par $\Delta f = \nabla\nabla f = \partial^2 f/\partial x^2 + \partial^2 f/\partial y^2 + \partial^2 f/\partial z^2$. L'équation (35) est appelée *équation de Poisson* pour le potentiel φ. Elle est baptisée d'après Siméon Denis Poisson (1781–1840), éminent physicien et mathématicien français. Les positions pour lesquelles ρ n'est pas nul sont appelées les *sources* du potentiel. Le mot source ainsi dénommé $\Delta\varphi$ d'une fonction est une quantification du nombre de fois où la fonction $\varphi(x)$ en un point x diffère de la valeur moyenne dans une région autour du point. (Pouvez-vous montrer cela, en montrant que $\Delta\varphi \approx \bar{\varphi} - \varphi(x)$?) En d'autres termes, l'équation de Poisson (35) suggère que la valeur réelle du potentiel en un point est la même que la valeur moyenne autour du point moins la masse volumique multipliée par $4\pi G$. En particulier, dans la situation d'un espace vide, le potentiel en un point est égal à la moyenne du potentiel autour de ce point.

Défi 237 pe

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

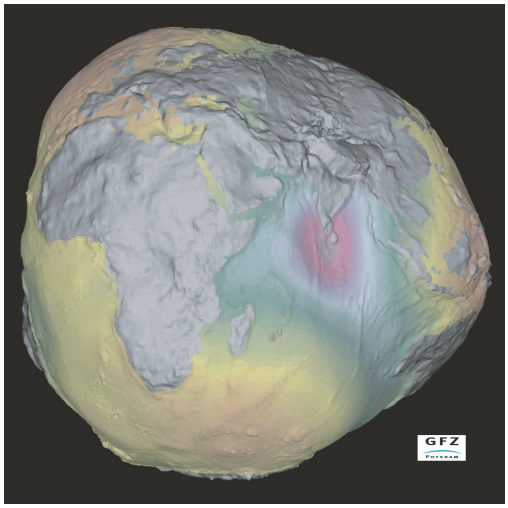


FIGURE 73 La forme de la Terre, en exagérant les hauteurs. (© GeoForschungsZentrum Potsdam)

Le potentiel φ est une grandeur captivante : avec un simple nombre à chaque position de l'espace, nous pouvons décrire l'apparence du vecteur de l'accélération gravitationnelle. Cela aboutit mécaniquement à la conclusion que la gravité en Nouvelle-Zélande agit dans la direction opposée à la gravité à Paris. De plus, le potentiel suggère l'introduction de l'*énergie potentielle* U en posant

$$U = m\varphi \tag{36}$$

et nous permet ainsi de déterminer la variation de l'énergie *cinétique* T d'un corps en chute libre d'un point 1 à un point 2 par

$$T_1 - T_2 = U_2 - U_1 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2}m_1\mathbf{v}_1{}^2 - \frac{1}{2}m_2\mathbf{v}_2{}^2 = m\varphi_2 - m\varphi_1 \,. \tag{37}$$

D'une autre façon, l'énergie totale, définie comme étant la somme des énergies cinétique et potentielle, est *conservée* durant le mouvement due à la gravité. C'est une caractéristique inhérente à la gravitation. Toutes les accélérations ne dérivent pas forcément d'un potentiel. Les systèmes qui ont cette propriété sont appelés *conservatifs*. Les accélérations dues aux frottements ne sont pas conservatives, mais celles dues à l'électromagnétisme le sont.

De manière intéressante, le nombre d de dimensions de l'espace est contenu implicitement dans le potentiel d'une masse sphérique : sa dépendance par rapport au rayon r est en réalité $1/r^{d-2}$. L'exposant $d-2$ a été vérifié expérimentalement jusqu'à une précision élevée : aucune déviation de d par rapport à 3 n'a été relevée.

Défi 238 s

Réf. 100

Souvent, le concept de *champ gravitationnel* est introduit, défini comme $\mathbf{g} = -\nabla\varphi$. Nous négligerons ce point dans notre promenade, parce que nous découvrirons, en suivant la théorie de la relativité, que la gravité n'est pas du tout causée par un champ. En réalité, même le concept de potentiel gravitationnel se révèle n'être qu'une approximation.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Le concept de potentiel nous aide à mieux comprendre la *forme* de la Terre. Puisque la majeure partie de la Terre est toujours liquide lorsqu'elle est observée à grande échelle, sa surface est toujours horizontale par rapport à la direction déterminée par la combinaison des accélérations de la gravité et de la rotation. En résumé, la Terre n'est *pas* une sphère. Ce n'est pas un ellipsoïde non plus. La forme mathématique définie par l'exigence d'équilibre est appelée un *géoïde*. La forme du géoïde diffère d'un ellipsoïde convenablement choisi de tout au plus 50 m. Pouvez-vous décrire mathématiquement le géoïde ? Le géoïde est une excellente approximation de la forme véritable de la Terre. Le niveau de la mer diverge de celui-ci de moins de 20 mètres. Les différences peuvent être mesurées avec un satellite équipé d'un radar et sont d'un intérêt crucial pour les géologues et les géographes. Par exemple, il a été montré que le pôle Sud est plus proche du plan équatorial que le pôle Nord d'environ 30 m. Cela est probablement dû aux vastes étendues massives des terres de l'hémisphère Nord.

Réf. 101
Réf. 102
Défi 239 pe

Nous avons vu précédemment comment l'inertie de la matière, à travers ladite « force centrifuge », agrandit le rayon de la Terre à l'équateur. Dit autrement, la Terre est *aplatie* aux pôles. L'équateur possède un rayon a de 6,38 Mm, tandis que la distance b des pôles au centre de la Terre est de 6,36 Mm. L'écrasement précis $(a - b)/a$ est égal à $1/298,3 = 0,0034$. En conséquence, le sommet du mont Chimborazo en Équateur, même si sa hauteur n'est que de 6 267 m au-dessus du niveau de la mer, est plus éloigné du centre de la Terre d'environ 20 km que le sommet du mont Sagarmatha* au Népal, dont la hauteur au-dessus du niveau de la mer est de 8 850 m. Le sommet du mont Chimborazo est en réalité le point de la surface du globe le plus éloigné du centre de la Terre.

Page 95
Appendix B

Par conséquent, si la Terre s'arrêtait de tourner (mais gardait sa forme), l'eau contenue dans les océans s'écoulerait vers le nord : toute l'Europe se retrouverait sous l'eau, mis à part les quelques montagnes de la chaîne des Alpes qui ont une hauteur supérieure à environ 4 km. Les régions nordiques de l'Europe seraient recouvertes par une couche d'eau de 6 km à 10 km d'épaisseur. Le mont Sagarmatha serait à 11 km au-dessus du niveau de la mer. Si nous prenons en compte le changement de la forme de la Terre qui en résulterait, ces chiffres seraient plus petits. De plus, le changement de forme provoquerait des tempêtes et des séismes extrêmement violents. Aussi longtemps que ces effets ne surviennent pas, nous pourrons être *certains* que le Soleil se lèvera vraiment demain, contrairement à ce que certains philosophes laissent sous-entendre.

Page 86

La dynamique – Comment les choses bougent-elles dans plusieurs dimensions ?

Résumons un peu la situation. Si un corps ne peut se déplacer que le long d'une ligne (éventuellement courbe), les notions d'énergies cinétique et potentielle sont suffisantes pour déterminer la façon dont il se déplace. Brièvement, le mouvement en *une dimension* découle directement de la conservation de l'énergie.

Si plus de *deux dimensions spatiales* sont impliquées, la conservation de l'énergie est insuffisante pour caractériser la manière dont un corps se déplace. Si un corps peut se mouvoir dans *deux dimensions*, *et* si les forces en jeu sont internes (ce qui est toujours le cas en théorie, mais jamais en pratique), la conservation du moment cinétique peut être invoquée. Le mouvement complet en deux dimensions découle donc de la conservation

* Le mont Sagarmatha est plus connu sous le nom de mont Everest.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

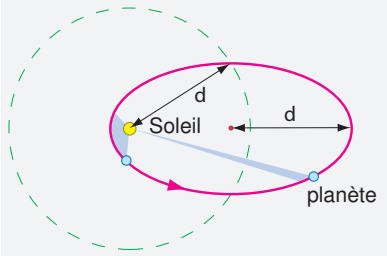


FIGURE 74 Le mouvement d'une planète autour du Soleil, indiquant son demi-grand axe d, qui représente également la distance moyenne au Soleil.

de l'énergie et du moment cinétique. Par exemple, toutes les propriétés de la chute libre vérifient la conservation de l'énergie et du moment cinétique. (Êtes-vous capable de le montrer ?)

Défi 240 s

Dans le cas du mouvement dans *trois dimensions*, une loi plus générale est nécessaire pour déterminer le mouvement. Il apparaît que tout mouvement découle d'un principe élémentaire : l'intégrale de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle sur un intervalle de temps est toujours la plus petite possible. C'est le *principe de moindre action*. Nous expliquerons plus en détail cette méthode de calcul par la suite.

Page 173

Pour des mouvements gravitationnels simples, le mouvement est bidimensionnel. La plupart des problèmes en trois dimensions dépassent le cadre de ce texte. En fait, quelques-uns de ces problèmes font toujours l'objet de recherches actives. Dans cette aventure, nous explorerons le mouvement tridimensionnel uniquement pour des situations sélectionnées qui fournissent d'importantes perspectives.

La gravitation dans le ciel

L'expression de l'accélération due à la gravitation $a = GM/r^2$ décrit également le mouvement de toutes les planètes autour du Soleil. N'importe qui peut vérifier que les planètes restent toujours à l'intérieur du *Zodiaque*, une étroite bande qui traverse le ciel. La ligne centrale du Zodiaque représente la trajectoire du Soleil et est appelée l'*écliptique*, parce que la Lune doit être située sur celle-ci pour provoquer une éclipse. Mais le mouvement détaillé des planètes n'est pas aisé à décrire*. Quelques générations avant Hooke, l'astronome souabe Johannes Kepler avait deviné plusieurs « lois » dans sa recherche scrupuleuse du mouvement des planètes dans le Zodiaque. Les trois principales sont les suivantes :

1. Les planètes décrivent des trajectoires elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers (1609).
2. Les planètes balaient des aires égales en des temps égaux (1609).
3. Toutes les planètes ont le même rapport T^2/d^3 entre la période sidérale T et le demi-grand axe d (1619).

Les principaux résultats sont formulés dans la Figure 74. La découverte de ces trois « lois » a nécessité un travail véritablement titanesque. Kepler n'avait aucune machine à calculer à sa disposition, ni même de règle à calcul. Le procédé qu'il utilisa pour ses calculs faisait

* La hauteur apparente de l'écliptique varie selon la période de l'année et c'est la raison pour laquelle les saisons existent. Par conséquent, les saisons sont aussi des répercussions de la gravitation.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 75 La modification de l'apparence de la Lune pendant le mois lunaire, révélant sa libration. (© Martin Elsässer)

appel aux logarithmes, tout juste découverts. Toute personne qui a déjà utilisé des tables de logarithmes pour réaliser des calculs peut avoir une idée de la quantité de travail qui se trouve derrière ces trois découvertes.

La seconde « loi » à propos des aires balayées égales signifie que les planètes se meuvent plus rapidement lorsqu'elles sont proches du Soleil. C'est une autre façon de formuler la conservation du moment cinétique. Mais maintenant, nous arrivons au point crucial. Le volume colossal du travail réalisé par Brahe et Kepler peut être synthétisé dans l'expression $a = GM/r^2$. Pouvez-vous confirmer que les trois « lois » découlent toutes de
Défi 241 pe l'expression de l'attraction universelle de Hooke ? En publiant cette découverte, Newton réalisa sa réussite majeure. Essayez de reproduire cet exploit : cela vous familiarisera non seulement avec les écueils, mais également avec le potentiel de la physique, et vous donnera la satisfaction réjouissante que procure la résolution des énigmes.

Newton a résolu l'énigme à l'aide de croquis géométriques. Newton ne pouvait pas écrire, et encore moins manipuler, les équations différentielles lorsqu'il a publié ses ré-
Réf. 24 sultats sur l'attraction universelle. En fait, il est bien connu que les méthodes de notation et de calcul de Newton étaient rudimentaires. (Beaucoup plus rudimentaires que les vôtres !) Le mathématicien anglais Godfrey Hardy* avait l'habitude de dire que l'insistance à utiliser la notation intégrale et différentielle de Newton plutôt que la méthode antérieure et meilleure due à son rival Leibniz, toujours en usage aujourd'hui, avait projeté les mathématiques anglaises cent ans en arrière.

Kepler, Hooke et Newton devinrent célèbres parce qu'ils mirent de l'ordre dans la description des mouvements planétaires. Cette réussite, bien que d'utilité pratique réduite, fut largement diffusée parce que l'astrologie était ancrée dans les esprits depuis très longtemps.

Pourtant, la gravitation ne se limite pas à cela. L'attraction universelle explique le mouvement et la forme de la Voie lactée et des autres galaxies, le mouvement de nombreux

* Godfrey Harold Hardy (1877–1947) était un théoricien des nombres, Britannique de premier plan, et l'auteur de la célèbre *Apologie d'un mathématicien*. Il « découvrit » également le célèbre mathématicien indien Srinivasa Ramanujan et le rapatria en Grande-Bretagne.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

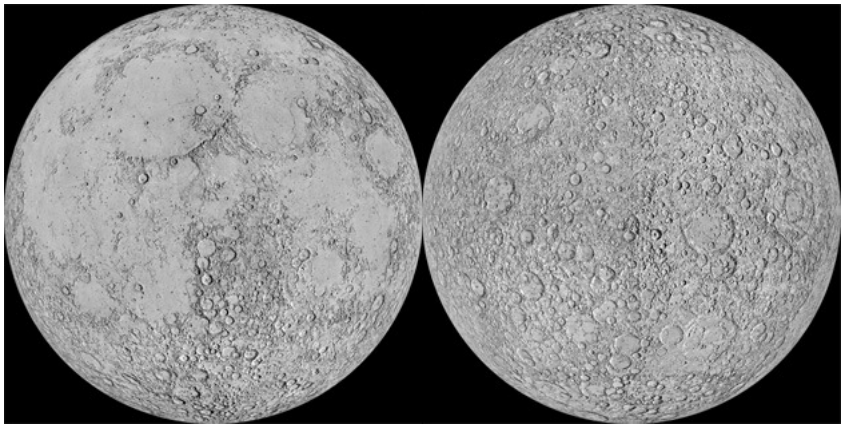


FIGURE 76 Cartographies de la face visible (à gauche) et de la face cachée (à droite) de la Lune, montrant le nombre de fois que cette dernière a protégé la Terre d'impacts de météorites (avec l'amabilité de l'USGS).

phénomènes climatiques, et explique pourquoi la Terre possède une atmosphère mais pas la Lune. (Pouvez-vous expliquer cela ?) En fait, la gravitation universelle nous en apprend beaucoup plus au sujet de la Lune.

Défi 242 s

La Lune

Combien dure une journée sur la Lune ? La réponse est à peu près 14 journées terrestres. C'est le temps qu'il faut sur la Lune pour voir le Soleil de nouveau à une position donnée.

Nous entendons souvent que la Lune montre toujours la même face à la Terre. Mais ceci est faux. Comme nous pouvons le vérifier à l'œil nu, un point de repère fixé au centre de la face de la Lune lors de la pleine Lune n'est pas au centre une semaine après. Les divers mouvements qui conduisent à cette modification sont appelés *librations*. Elles sont indiquées dans le film de la Figure 75*. Ces mouvements apparaissent principalement parce que la Lune ne décrit pas une orbite circulaire, mais elliptique, autour de la Terre et parce que l'axe de la Lune est légèrement incliné par rapport à celui de sa révolution autour de la Terre. Par conséquent, autour de 45 % de la surface de la Lune est constamment masquée à la Terre.

Les premiers clichés des régions cachées furent pris dans les années 1960 par un satellite artificiel soviétique. Les satellites modernes ont fourni des cartes précises, comme sur la Figure 76. La surface de la face cachée est beaucoup plus accidentée que celle de la face visible, puisqu'elle est du côté qui intercepte la plupart des astéroïdes qui tombent sous l'influence de la Terre. Ainsi l'attraction de la Lune permet de dévier les astéroïdes de la Terre. Le nombre potentiel d'extinctions massives de la vie animale est donc réduit à une portion petite, mais non négligeable. En d'autres termes, l'attraction gravitationnelle de la Lune a de nombreuses fois sauvé la race humaine de l'extermination**.

* Le film est au format AVI DivX 5 et nécessite un composant logiciel (plug-in) dans Acrobat Reader pour pouvoir être visualisé.

** Les pages Web http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Closest.html et InnerPlot.html donnent une idée du

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les voyages sur la Lune des années 1970 ont également montré que la Lune tire son origine de la Terre elle-même : il y a très longtemps, un objet frappa la Terre de façon presque tangentielle et projeta une portion considérable de matière dans l'espace. C'est le seul mécanisme capable de donner une explication à la grande taille de la Lune, à son faible contenu en fer et également à sa composition générale en matériaux.

Réf. 103

La Lune est en train de s'éloigner de la Terre à raison de 3,8 cm par an. Ce fait entérine l'hypothèse ancienne qui stipulait que les marées ralentissent la rotation de la Terre. Pouvez-vous imaginer comment cette déduction a pu être effectuée ? Puisque la Lune ralentit la Terre, la Terre change aussi de forme en réponse à cet effet. (Souvenez-vous que la forme de la Terre dépend de sa vitesse de rotation.) Ces variations de forme influencent l'activité tectonique de la Terre, et peut-être aussi la dérive des continents.

Réf. 104

Défi 243 s

La Lune a de nombreux effets sur la vie animale. Un exemple célèbre est le moustique *Clunio*, qui vit sur les côtes à fortes marées. Clunio passe entre six et douze semaines au stade larvaire, il se métamorphose alors pour vivre seulement pendant une ou deux heures comme un insecte volant adulte, temps pendant lequel il se reproduit. Les moustiques ne se reproduiront que s'ils sont sortis pendant la période de marée basse d'une grande marée. Les grandes marées sont les marées particulièrement fortes qui se produisent pendant les pleines et nouvelles lunes, lorsque les effets solaire et lunaire s'additionnent. Elles apparaissent seulement tous les 14,8 jours. En 1995, Dietrich Neumann a montré que les larves ont deux horloges intégrées, une de rythme circadien et l'autre de rythme circalunaire, qui déterminent ensemble la métamorphose à ces quelques heures précises où l'insecte peut se reproduire. Il montra également que l'horloge circalunaire est synchronisée par la luminosité nocturne de la Lune. Autrement dit, les larves surveillent la Lune la nuit et décident ainsi quand elles devront se métamorphoser : elles sont les plus petits astronomes connus.

Réf. 105

Si les insectes peuvent avoir des cycles circalunaires, il ne devrait pas être surprenant que les femmes aient de tels cycles. Cependant, dans ce cas précis, l'origine de la longueur du cycle est toujours inconnue.

Réf. 106

La Lune aide également à stabiliser l'inclinaison de l'axe de la Terre, le conservant dans une position plus ou moins figée relativement au plan de la trajectoire autour du Soleil. Sans la Lune, l'axe changerait de direction de façon imprévisible, nous n'aurions pas de rythme régulier du jour et de la nuit, nous aurions des variations climatiques extrêmement fortes, et l'évolution de la vie aurait été impossible. Sans la Lune, la Terre tournerait aussi beaucoup plus rapidement et nous aurions un temps beaucoup moins clément. Le principal effet résiduel de la Lune sur la Terre, la précession de son axe, est responsable des ères glaciaires.

Réf. 107

Réf. 108

Page 100

En outre, la Lune protège la Terre des rayons cosmiques en augmentant considérablement le champ magnétique terrestre. En d'autres termes, l'importance de la Lune est cruciale pour l'évolution de la vie. Comprendre comment les planètes de la taille de la Terre arrivent à avoir des satellites de la taille de la Lune est donc primordial pour estimer la probabilité que la vie existe sur d'autres planètes. Jusqu'à présent, il semble que les très grands satellites soient rares, il n'y a que quatre lunes recensées plus grandes que celle de la Terre, mais elles tournent autour de planètes plus grosses, à savoir Jupiter et

Réf. 109

nombre approximatif d'objets qui frappent la Terre chaque année. Sans la Lune, nous aurions beaucoup plus de cataclysmes.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

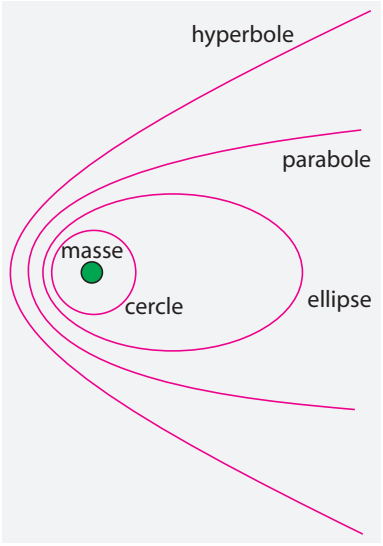


FIGURE 77 Les orbites possibles dues à l'attraction universelle.

Saturne. En fait, la formation des satellites est toujours un domaine actif de recherches. Mais revenons aux conséquences de la gravitation dans le ciel.

Les orbites

La trajectoire d'un corps orbitant autour d'un autre sous l'influence de la gravité forme une ellipse dont l'un des foyers est occupé par le corps central. Une orbite circulaire est également possible, un cercle étant un cas particulier d'ellipse. La trajectoire d'un objet gravitant près d'un autre peut aussi prendre la forme d'une parabole ou d'une hyperbole, comme indiqué sur la Figure 77. Les cercles, ellipses, paraboles et hyperboles sont collectivement désignés sous l'appellation *sections coniques*. En réalité chacune de ces courbes peut être mise en évidence en coupant un cône avec un couteau. Pouvez-vous le montrer ? Défi 244 e

Si les orbites sont principalement des ellipses, il s'ensuit que les comètes reviennent. L'astronome anglais Edmund Halley (1656–1742) fut le premier à exprimer cette conclusion et à prédire le retour d'une comète. Elle arriva à la date prévue en 1756, et est dorénavant baptisée d'après son nom. La période de la comète de Halley est comprise entre 74 et 80 ans, la première observation enregistrée a été faite il y a 22 siècles, et elle a été observée depuis à chacun de ses 30 passages, le dernier datant de 1986.

Selon l'énergie initiale et le moment cinétique initial du corps par rapport à l'astre central, il existe deux autres possibilités : les trajectoires *paraboliques* et les trajectoires *hyperboliques*. Pouvez-vous déterminer les conditions que l'énergie et le moment cinétique doivent vérifier pour que ces trajectoires apparaissent ? Défi 245 pe

Concrètement, les trajectoires paraboliques n'existent pas dans la nature. (Bien que certaines comètes semblent s'approcher de cette situation lorsqu'elles se déplacent autour du Soleil, presque toutes les comètes suivent des courbes elliptiques.) Les trajectoires hyperboliques existent : des satellites artificiels en empruntent lorsqu'ils sont lancés vers une planète, généralement dans le but de modifier la direction du satellite à travers le

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Système solaire.

Pourquoi la « loi » en l'inverse du carré nous amène-t-elle aux sections coniques ? Premièrement, pour deux corps, le moment cinétique total L est une constante :

$$L = mr^2\dot{\varphi} \tag{38}$$

et par conséquent les mouvements se produisent dans un plan. L'énergie E est aussi une constante

$$E = \frac{1}{2}m(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t})^2 + \frac{1}{2}m(r\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t})^2 - G\frac{mM}{r} \ . \tag{39}$$

Défi 246 pe Ensemble, ces deux équations impliquent que

$$r = \frac{L^2}{Gm^2M} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{G^2m^3M^2}}\cos\varphi} \ . \tag{40}$$

Maintenant, toute courbe définie par l'expression générale

$$r = \frac{C}{1 + e\cos\varphi} \quad \text{ou} \quad r = \frac{C}{1 - e\cos\varphi} \tag{41}$$

est une ellipse pour $0 < e < 1$, une parabole pour $e = 1$ et une hyperbole pour $e > 1$, un des foyers étant à l'origine. La quantité e, appelée *excentricité*, décrit comment la courbe est resserrée. En d'autres mots, un corps en orbite autour d'une masse centrale suit une section conique.

Dans toutes les orbites, la masse pesante centrale se déplace également. En fait, les deux corps orbitent autour de leur centre de masse commun. Les deux corps suivent le même type de courbe (ellipse, parabole ou hyperbole), mais les dimensions de chaque
Défi 247 e courbe diffèrent.

Si plus de deux objets se déplacent sous une influence gravitationnelle mutuelle, de nombreuses possibilités supplémentaires pour le mouvement surgissent. La classification et les mouvements sont assez complexes. En fait, ce problème connu sous le nom de *problème de plusieurs corps* est toujours un thème de recherche, et les résultats sont mathématiquement fascinants. Regardons quelques exemples.

Quand plusieurs planètes encerclent une étoile, elles s'attirent également l'une vers l'autre. Les planètes ne se déplacent donc pas le long d'ellipses parfaites. La déviation la plus grande est l'avancée du périhélie, tel qu'indiqué sur la Figure 55. Elle est observée pour Mercure et quelques-unes des autres planètes, y compris la Terre. D'autres différences par rapport à la forme elliptique surgissent le temps d'une révolution. En 1846, les écarts observés du mouvement de la planète Uranus par rapport à la trajectoire prévue par la gravité universelle furent mis à profit pour prédire l'existence d'une autre planète, Neptune, qui fut découverte quelque temps plus tard.

Page 78 Nous avons vu que la masse est toujours positive et que la gravitation est par conséquent toujours attractive. Il n'y a pas d'*antigravité*. La gravité peut-elle néanmoins être utilisée pour la *lévitation*, éventuellement en utilisant plus de deux corps ? Oui, il y en a

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

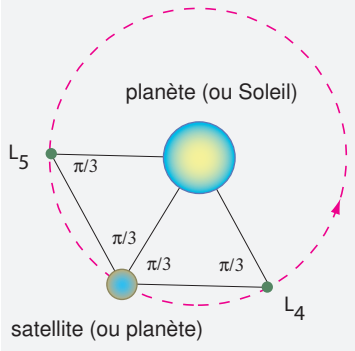


FIGURE 78 Deux points de Lagrange stables.

deux exemples*. Les premiers sont les satellites géostationnaires, qui sont utilisés pour les transmissions de chaînes télévisées et d'autres signaux depuis et vers la Terre.

Les *points de Lagrange* (ou *points de libration*) en sont les seconds exemples. Baptisés d'après leur découvreur, ce sont des points de l'espace situés à proximité d'un système à deux corps, tel que Lune–Terre ou Terre–Soleil, à l'emplacement desquels des petits objets ont une position d'équilibre stable. Un aperçu en est donné sur la Figure 78. Pouvez-vous déterminer leur position précise, en vous souvenant qu'il faut prendre en compte la rotation ? Il y a trois points de Lagrange supplémentaires sur la ligne Terre–Lune. Combien d'entre eux sont-ils stables ?

Défi 248 pe
Défi 249 pe

Il existe des milliers d'astéroïdes, appelés *astéroïdes troyens*, à l'emplacement et autour des points de Lagrange du système Soleil–Jupiter. En 1990, un astéroïde troyen du système Mars–Soleil fut repéré. Finalement, en 1997, un astéroïde « presque troyen » a été découvert qui suit la Terre dans sa course autour du Soleil (il est seulement transitoire et suit une orbite quelque peu compliquée). Ce « second compagnon » de la Terre a un diamètre de 5 km. De la même manière, une forte concentration de poussières a été observée aux principaux points de Lagrange du système Terre–Lune.

Réf. 110

Pour résumer, l'équation simple $\mathbf{a} = -GM\mathbf{r}/r^3$ décrit correctement un grand nombre de phénomènes célestes. La première personne à révéler de manière claire que cette expression explique *tout* ce qui se passe dans le ciel fut Pierre Simon Laplace** dans son fameux livre *Traité de mécanique céleste*. Lorsque Napoléon l'interrogea sur le fait qu'il ne faisait aucune mention du Créateur dans son livre, Laplace répondit par sa célèbre sentence, qui résume à elle seule l'ouvrage : « *Je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse* ». En particulier, Laplace étudia la stabilité du Système solaire, l'excentricité de l'orbite lunaire et les excentricités des orbites planétaires, en donnant toujours un parfait accord entre les calculs théoriques et les observations.

Ces résultats sont de véritables prouesses pour l'expression simple de l'attraction universelle. Ils expliquent également pourquoi elle est qualifiée d'« universelle ». Mais jusqu'à quelle précision cette formule peut-elle aller ? Puisque l'astronomie permet la me-

* La lévitation est discutée en détail à la page **??**.

** Pierre Simon Laplace (n. Beaumont-en-Auge1749, d. Paris 1827), important mathématicien français. Son traité fut édité en cinq volumes entre 1798 et 1825. Il fut le premier à proposer l'idée que le Système solaire s'est formé à partir d'un nuage de gaz en rotation, et un des premiers personnages à imaginer et explorer les trous noirs.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

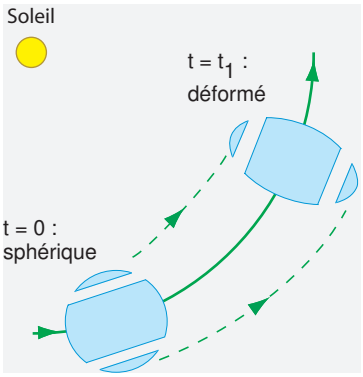


FIGURE 79 Déformation de marée due à la gravité.

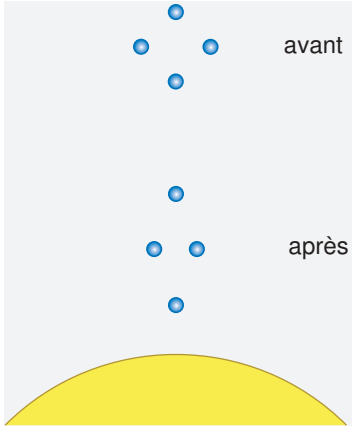


FIGURE 80 L'origine des marées.

sure la plus précise des mouvements gravitationnels, elle fournit également les tests les plus rigoureux. En 1849, Urbain Le Verrier conclut après une étude intensive qu'il n'y avait qu'un seul exemple connu de désaccord entre l'observation et la gravité universelle, à savoir une observation concernant la planète Mercure. (Actuellement quelques autres sont connus.) Le point de l'orbite de la planète Mercure le moins éloigné du Soleil, son *périhélie*, se déplace selon une cadence qui est légèrement moindre que celle prédite : il releva une minuscule différence, autour de 38″ par siècle. (Ceci fut rectifié à 43″ par siècle en 1882 par Simon Newcomb.) Le Verrier soupçonnait que cet écart était dû à une planète située entre Mercure et le Soleil, *Vulcain*, qu'il pourchassa de nombreuses années durant, en vain. L'étude du mouvement dut attendre Albert Einstein pour trouver une explication correcte de cette différence.

Réf. 111

Les Marées

Pourquoi les manuels de physique évoquent-ils toujours le phénomène des marées ? Parce que, comme nous le montrera la relativité générale, les marées prouvent que l'espace est courbé ! Il est donc très utile de les étudier avec un peu plus d'attention. Les marées éveillent l'intérêt. La gravitation explique les marées océaniques comme une conséquence de l'attraction de l'eau des océans par la Lune et le Soleil. Même si leur amplitude n'est que d'environ 0,5 m au large, elle peut atteindre 20 m en certains endroits particuliers proches des côtes. Pouvez-vous imaginer pourquoi ? La *terre* également est soulevée et rabaissée par le Soleil et la Lune, d'environ 0,3 m, comme les mesures par satellites l'indiquent. Même l'*atmosphère* est sujette aux marées, et les variations de pression correspondantes peuvent être déduites des relevés de la pression atmosphérique.

Défi 250 s

Réf. 39

Réf. 112

Les marées apparaissent sur chaque corps *étendu* se déplaçant dans le champ gravitationnel d'un autre. Pour saisir l'origine des marées, dessinez un corps en orbite, comme la Terre, et imaginez ses constituants, telles les calottes de la Figure 79, comme étant retenus entre eux par des ressorts. La gravité universelle implique que les vitesses des orbites sont plus lentes lorsqu'elles sont plus distantes du corps central. Par conséquent, la calotte à l'extérieur de l'orbite sera vue comme étant plus lente que celle du milieu, mais

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

elle est *tirée* par le reste du corps par le truchement des ressorts. Au contraire, le fragment intérieur sera vu comme orbitant plus rapidement, mais il est *retenu* par les autres. Étant ralentie, la calotte intérieure cherche à tomber en direction du Soleil ; l'autre calotte étant accélérée, elle tend à s'en éloigner. Au total, les deux calottes ressentent un étirement vers l'extérieur par rapport au centre du corps, limité par les ressorts qui freinent la déformation. En conclusion, *les corps étendus sont déformés dans la direction de l'hétérogénéité du champ*.

Par exemple, en raison des forces de marées la Lune présente toujours (approximativement) la même face à la Terre. En plus, son rayon dans la direction de la Terre est plus grand d'environ 5 m que le rayon perpendiculaire à celle-ci. Si les ressorts internes sont trop faibles, le corps est déchiqueté en morceaux. De cette manière un *anneau* de fragments peut se former, tel que la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter ou les anneaux autour de Saturne.

Revenons à la Terre. Si un corps est entouré d'eau, il formera des bourrelets dans la direction du champ gravitationnel appliqué. Afin de mesurer et de comparer l'intensité des forces de marées dues au Soleil et à la Lune, nous simplifions les effets des marées à leur strict minimum. Comme indiqué sur la Figure 80, nous pouvons étudier la déformation d'un corps due à la gravité en analysant la déformation de quatre morceaux. Nous pouvons l'étudier dans le cas de la chute libre, parce que le mouvement orbital et la chute libre sont équivalents. Maintenant, la gravitation fera en sorte que certains des morceaux se rapprocheront et d'autres s'écarteront, en fonction de leur position relative. La figure révèle clairement que l'intensité de la déformation – l'eau ne possède pas de ressorts incorporés – dépend de la variation de l'accélération gravitationnelle avec la distance. En d'autres termes, l'accélération *relative* qui provoque les marées est proportionnelle à la dérivée de l'accélération gravitationnelle.

En utilisant les chiffres de l'Annexe B, les accélérations gravitationnelles du Soleil et de la Lune mesurées sur Terre sont

$$a_{\text{Soleil}} = \frac{GM_{\text{Soleil}}}{d_{\text{Soleil}}^2} = 5{,}9\,\text{mm/s}^2$$
$$a_{\text{Lune}} = \frac{GM_{\text{Lune}}}{d_{\text{Lune}}^2} = 0{,}033\,\text{mm/s}^2 \qquad (42)$$

et donc l'attraction de la Lune est environ 178 fois plus faible que celle du Soleil.

Quand deux corps proches tombent à proximité d'une grande masse, l'accélération relative est proportionnelle à leur distance, et vérifie $da = da/dr\, dr$. Le facteur de proportionnalité $da/dr = \nabla a$, appelé l'*accélération de marée* (gradient), est la véritable mesure
Défi 251 e des effets de marée. Près d'une grande masse sphérique M, elle est donnée par

$$\frac{da}{dr} = -\frac{2GM}{r^3} \qquad (43)$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

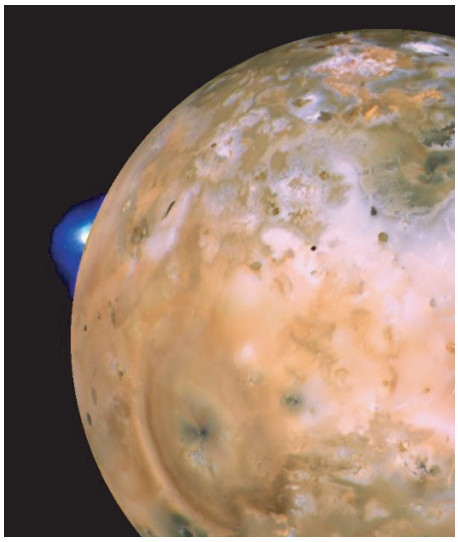


FIGURE 81 Un effet spectaculaire des marées : le volcanisme sur Io (NASA).

ce qui conduit aux valeurs

$$\frac{da_{\text{Soleil}}}{dr} = -\frac{2GM_{\text{Soleil}}}{d^3_{\text{Soleil}}} = -0{,}8 \cdot 10^{-13}\,/\text{s}^2$$
$$\frac{da_{\text{Lune}}}{dr} = -\frac{2GM_{\text{Lune}}}{d^3_{\text{Lune}}} = -1{,}7 \cdot 10^{-13}\,/\text{s}^2\ . \qquad (44)$$

De façon plus qualitative, bien que l'étirement dû à la Lune soit beaucoup plus fort, on prédit que ses marées sont un peu plus de *deux fois plus fortes* que les marées du soleil, ce qui est véritablement observé. Quand le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, les deux marées s'additionnent, ces *grandes marées* sont particulièrement fortes et se produisent tous les 14,8 jours, à la pleine et à la nouvelle Lune.

Les marées produisent également des *frottements*. Les frottements conduisent à un ralentissement de la rotation de la Terre. Aujourd'hui, le ralentissement peut être évalué par des horloges précises (alors même que des variations de courtes durées dues à d'autres causes, comme le climat, sont nettement plus importantes). Les résultats s'accordent bien avec les fossiles montrant qu'il y a 400 millions d'années, pendant la période dévonienne, une année comptait 400 jours, et une journée à peu près 22 heures. Il a été également estimé qu'il y a 900 millions d'années chacune des 481 journées que comptait une année durait 18,2 heures. Le frottement à la base de ce ralentissement a également pour conséquence une augmentation de la distance de la Lune à la Terre d'environ 3,8 cm par an. Êtes-vous capable d'expliquer pourquoi ?

Réf. 72
Page 210
Défi 252 s

Comme mentionné ci-dessus, le mouvement de la croûte terrestre dû aux marées est également responsable du déclenchement des *tremblements de terre*. Donc la Lune peut aussi produire des effets dangereux sur la Terre. (Malheureusement, la connaissance de ces mécanismes ne permet pas de prédire les tremblements de terre.) L'exemple le plus fascinant des effets des marées est observé sur Io, un satellite de Jupiter. Ses marées sont si

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

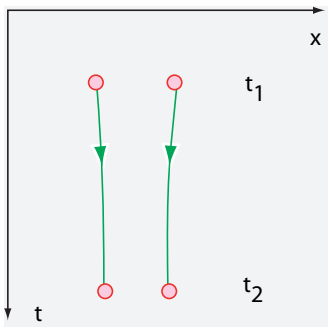


FIGURE 82 Des particules tombant côte à côte se rapprochent au cours du temps.

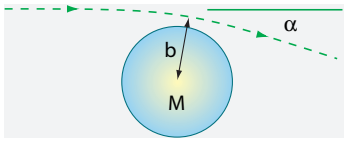


FIGURE 83 La masse fléchit la lumière.

fortes qu'elles entraînent une intense activité volcanique, comme indiqué sur la Figure 81, avec des panaches éruptifs pouvant atteindre 500 km de haut. Si les marées sont encore plus fortes, elles peuvent détruire entièrement le corps, comme cela s'est produit pour l'astre situé entre Mars et Jupiter qui a donné naissance aux planétoïdes, et (probablement) pour les lunes qui ont enfanté les anneaux de Saturne.

Pour résumer, les marées sont dues aux accélérations relatives entre des masses
Page 123 proches. Ceci a une conséquence importante. Dans le chapitre sur la relativité générale nous découvrirons que le temps multiplié par la vitesse de la lumière joue le même rôle que la distance. Le temps devient donc une dimension supplémentaire, comme indiqué sur la Figure 82. En exploitant cette similitude, deux particules libres se déplaçant dans la même direction correspondent à des lignes parallèles dans l'espace-temps. Deux particules tombant côte à côte correspondent aussi à des lignes parallèles. Les marées montrent que de telles particules se rapprochent l'une de l'autre. En d'autres termes,
Page 174 les marées impliquent que des lignes parallèles se rapprochent l'une de l'autre. Mais des lignes parallèles peuvent se rapprocher l'une de l'autre *seulement* si l'espace-temps est courbé. Brièvement, les marées impliquent que l'espace et l'espace-temps sont *courbés*. Ce raisonnement élémentaire aurait pu être accompli durant le dix-huitième siècle, cependant, il fallut encore 200 ans de plus et tout le génie d'Albert Einstein pour le révéler.

La lumière peut-elle tomber ?

> « Die Maxime, jederzeit selbst zu denken, ist die Aufklärung*. »
>
> Emmanuel Kant

Vers la fin du dix-septième siècle le monde découvrait que la lumière possède une
Page 15 vitesse finie – une épopée que nous relaterons en détail plus tard. Une entité qui se déplacerait avec une vitesse infinie ne pourrait être affectée par la gravité, du fait que celle-ci n'aurait pas le temps d'y produire son effet. Une entité dotée d'une vitesse finie, par contre, se doit de ressentir la gravité et donc tombe.

* La maxime de penser toujours par soi-même, c'est la culture de l'esprit.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Lorsque la lumière parvient à la surface de la Terre, sa vitesse a-t-elle augmenté ? Pendant presque trois siècles les gens n'avaient aucun moyen en leur possession pour détecter de tels effets. Ainsi cette question ne fut pas étudiée. En 1801, l'astronome prussien Réf. 113 Johann Soldner (1776–1833) fut le premier à poser la question d'une manière différente. Étant astronome, il était habitué à observer les étoiles et à mesurer leur angle de visée. Il réalisa que la lumière qui passe près d'un corps massif devrait être *déviée* à cause de la gravité.

Soldner analysa la situation d'un corps sur une trajectoire hyperbolique, se déplaçant à une vitesse c à la distance b (mesurée depuis le centre) d'une masse sphérique M, tel Défi 253 pe que schématisé sur la Figure 83. Soldner déduisit l'expression de l'angle de déviation

$$\alpha_{\text{grav. univ.}} = \frac{2}{b}\frac{GM}{c^2} \,. \tag{45}$$

Nous voyons que l'angle est maximal lorsque le corps en mouvement rase de très près la masse M. Pour la lumière déviée par la masse du Soleil, l'angle se révèle être tout au plus de 0,88″ = 4,3 µrad seulement. À l'époque de Soldner, cet angle était trop petit pour pouvoir être mesuré. Ainsi ce problème fut ignoré. Si sa résolution avait été poursuivie, la relativité générale aurait commencé comme science expérimentale, et non par l'effort Page 162 théorique d'Albert Einstein ! Pourquoi ? La valeur calculée par la formule ci-dessus est *différente* de la valeur mesurée. La première expérience eut lieu en 1919*, elle mit en évidence la dépendance correcte par rapport à la distance, mais releva un écart allant jusqu'à 1,75″, exactement le double de l'expression (45). La cause n'est pas facile à découvrir : en fait, l'écart est dû à la courbure de l'espace, comme nous le verrons. En bref, la lumière peut tomber, mais ce sujet masque de nombreuses surprises.

Qu'est-ce que la masse ? – Suite

La masse décrit comment un objet interagit avec les autres. Dans notre promenade, nous avons rencontré deux de ses caractéristiques. La *masse inertielle* est la propriété qui conserve le mouvement des objets et qui offre une résistance au changement de leur mouvement. La *masse gravitationnelle* est la propriété responsable de l'accélération des corps proches (l'aspect actif) ou de l'accélération de ces corps par des objets situés à proximité (l'aspect passif). Par exemple, l'aspect actif de la masse de la Terre détermine l'accélération des corps à sa surface. L'aspect passif de ces corps nous permet de les peser afin de mesurer leur masse en utilisant uniquement des distances, c'est-à-dire sur une bascule ou une balance. La masse gravitationnelle est le fondement du *poids*, qui est la résistance à soulever les choses**.

La masse gravitationnelle d'un corps est-elle égale à sa masse inertielle ? Une réponse approximative est donnée par l'expérience : un objet qu'il est difficile de déplacer est également difficile à soulever. L'expérimentation la plus simple est de prendre deux corps de masses différentes et de les laisser tomber. Si l'accélération est la même pour tous les corps, alors la masse inertielle est égale à la masse gravitationnelle (passive), parce que

Défi 254 pe * D'ailleurs, comment mesureriez-vous la déviation de la lumière à côté d'un Soleil éclatant ?

** Quelles sont les valeurs indiquées par une balance pour une personne de 85 kg jonglant avec trois balles Défi 255 pe de 0,3 kg chacune ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dans la relation $ma = \nabla(GMm/r)$ le m du membre de gauche est en réalité la masse inertielle, et le m du membre de droite est en fait la masse gravitationnelle.

Mais au dix-septième siècle Galilée avait largement diffusé un argument encore plus ancien démontrant, sans même recourir à une simple expérience, que l'accélération est en réalité la même pour tous les corps. Si des masses plus grandes tombaient plus rapidement que des masses plus petites, alors le paradoxe suivant devrait se présenter. N'importe quel corps peut être vu comme étant constitué d'un grand morceau relié à un petit fragment. Si les petits corps tombaient vraiment moins vite, le petit fragment devrait ralentir le grand dans sa chute, ainsi donc le corps complet devrait tomber *moins* rapidement que le grand fragment tout seul (ou se briser en morceaux). En même temps, le corps étant plus grand que ses parties, il devrait chuter *plus* rapidement que celles-ci. C'est évidemment impossible : toute masse doit tomber avec la même accélération.

De nombreuses expériences précises ont été réalisées depuis la discussion initiale de Galilée. Dans toutes celles-ci l'indépendance de l'accélération de la chute libre par rapport à la masse et à la composition matérielle a été confirmée avec la précision qu'elles
Réf. 114 permettaient. En d'autres mots, autant que nous puissions le dire, la masse gravitationnelle et la masse inertielle sont *équivalentes*. Quelle est la source de cette mystérieuse égalité ?

Ce prétendu « mystère » est un exemple typique de méconnaissance, maintenant répandue à travers le monde entier dans l'enseignement de la physique. Retournons à la
Page 72 définition de la masse comme étant l'inverse du rapport négatif entre les accélérations. Nous avions fait allusion au fait que les origines physiques des accélérations ne jouaient aucun rôle dans la définition parce que cette origine n'apparaît pas dans l'expression. En d'autres termes, la valeur de la masse est, par définition, indépendante de l'interaction. Cela signifie en particulier que la masse inertielle, fondée sur l'interaction électromagnétique, et la masse gravitationnelle sont identiques *par définition*.

Nous remarquons également que nous n'avons jamais défini un concept distinct pour la « masse gravitationnelle passive ». La masse qui est accélérée par la gravitation est la masse inertielle. Pire, il n'y a aucune manière de définir une « masse gravitationnelle
Défi 256 pe passive ». Essayez ! Toutes les méthodes, comme la pesée d'un objet, ne peuvent pas être distinguées de celles qui déterminent la masse inertielle à partir de sa réaction à l'accélération. En réalité, toutes les méthodes de mesure de masse utilisent des dispositifs non gravitationnels. Les balances en sont des exemples excellents.

Si la « masse gravitationnelle passive » était différente de la masse inertielle, nous aurions des conséquences inquiétantes. En considérant les corps pour lesquels elle serait différente nous aurions des problèmes avec la conservation de l'énergie. De la même façon, prétendre que la « masse gravitationnelle active » diffère de la masse inertielle nous attirerait des ennuis.

Une autre manière de considérer ce problème est la suivante : comment la « masse gravitationnelle » pourrait-elle se distinguer de la masse inertielle ? La différence dépendrait-elle de la vitesse relative, du temps, de la position, de la composition ou de la masse elle-même ? Chacune de ces possibilités contredit soit la conservation de l'énergie soit celle de la quantité de mouvement.

Il n'est pas étonnant que toutes les mesures confirment l'équivalence de tous les types de masses. Ce thème ressurgit dans la relativité générale, n'apportant aucun nouveau
Page 145 résultat probant. « Les deux » masses demeurent égales, la masse est une caractéristique

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

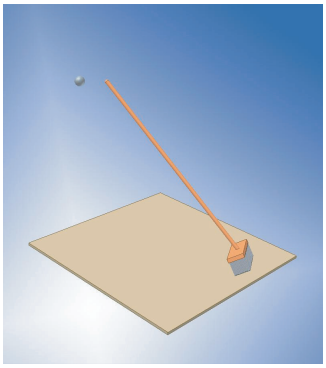


FIGURE 84 Les balais tombent plus rapidement que les pierres. (© Luca Gastaldi)

unique des corps. Un autre problème demeure, malgré tout. Quelle est la *source* de la masse ? Pourquoi existe-t-elle ? Cette question simple mais profonde ne peut pas trouver de réponse dans la physique classique. Nous devrons nous armer de patience avant de découvrir cela.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA GRAVITATION

> « Fallen ist weder gefährlich noch eine Schande ;
> Liegen bleiben ist beides*. »
>
> Konrad Adenauer

* *

La gravité sur la Lune ne représente qu'un sixième de celle sur Terre. Pourquoi ceci implique-t-il qu'il est difficile de marcher rapidement et de courir sur la Lune (comme il a pu être vu sur les images télévisées enregistrées sur place) ?

* *

L'expression en l'inverse du carré de l'attraction universelle possède une restriction : elle ne nous permet pas de faire des prédictions raisonnables sur la matière dans l'univers. La gravitation universelle prédit qu'une distribution de masse homogène est instable. En réalité, on observe une distribution non homogène. Toutefois, la gravitation universelle ne prédit pas la masse volumique moyenne, l'obscurité de la nuit, les vitesses observées des galaxies lointaines, etc. En fait, pas une seule propriété de l'univers n'est expliquée. Pour cela, nous aurons besoin de la relativité générale.

* *

Imaginez que vous ayez douze pièces d'apparence identique, dont l'une est contrefaite. La pièce falsifiée possède une masse différente des onze autres authentiques. Comment pouvez-vous déterminer laquelle est la pièce contrefaite et si elle est plus légère ou plus lourde, en utilisant une balance ordinaire uniquement trois fois ? Défi 257 e

* *

* « Chuter n'est ni dangereux ni honteux, rester couché est les deux à la fois. » Konrad Adenauer (n. Cologne 1876, d. Rhöndorf 1967), chancelier allemand.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

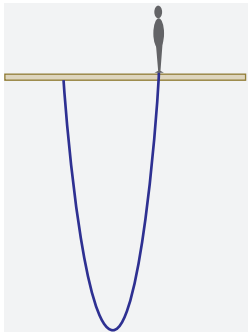


FIGURE 85 La situation initiale d'un sauteur à l'élastique.

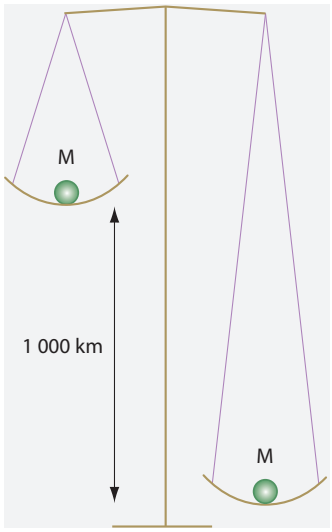


FIGURE 86 Une balance juste ?

Pour un physicien, l'*antigravité* est la gravité répulsive. Elle n'existe pas dans la nature. Cependant, le mot « antigravité » est utilisé de manière incorrecte par de nombreuses personnes, comme une rapide recherche sur Internet le montre. Certaines personnes nomment « antigravité » tout effet qui *surpasse* la gravité. Toutefois, cette définition implique que les tables et les chaises sont des dispositifs antigravitants. En suivant cette définition, la majorité des producteurs de bois, d'acier et de béton feraient affaire dans les métiers de l'antigravitation. La définition sur Internet n'a absolument aucun sens.

* *

Tous les objets sur Terre tombent-ils avec la même accélération de 9,8 m/s^2, sachant que la résistance due à l'air peut être négligée ? Non. Tous les concierges le savent. Vous pouvez vérifier cela par vous-même. Un balai faisant un angle d'environ 35° frappe le plancher avant une pierre, comme les sons des différents impacts le confirment. Êtes-vous
Défi 258 s capable d'expliquer pourquoi ?

* *

Les sauteurs à l'élastique sont aussi accélérés plus fortement que g. Pour un élastique de masse m et un sauteur de masse M, l'accélération maximum a est

$$a = g\left(1 + \frac{1}{8}\frac{m}{M}\left(4 + \frac{m}{M}\right)\right) . \tag{46}$$

Défi 259 s Pouvez déduire cette relation à partir de la Figure 85 ?

* *

Défi 260 s Devinette : quel est le poids d'une balle en liège d'un rayon de 1 m ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Devinette : 1 000 billes en fer de 1 mm de diamètre sont rassemblées en un amoncellement. Quelle est sa masse ? Défi 261 s

* *

Comment pouvez-vous tirer profit de vos observations faites durant vos voyages pour montrer que la Terre n'est pas plate ? Défi 262 s

* *

L'accélération due à la gravité est-elle constante ? Pas vraiment. Chaque jour, il est estimé que 10^8 kg de matière tombe sur la Terre sous la forme de météorites.

* *

La Terre et la Lune attirent toutes les deux les corps. Le centre de masse du système Terre–Lune est éloigné de 4 800 km du centre de la Terre, et est situé presque à côté de sa surface. Pourquoi les corps sur Terre tombent-ils toujours en direction du centre de la Terre ? Défi 263 s

* *

Chaque corps sphérique chute-t-il avec la même accélération ? Non. Si le poids de l'objet est comparable à celui de la Terre, la distance décroît d'une manière différente. Pouvez-vous entériner cette affirmation ? Qu'est-ce qui est faux alors dans l'argument de Galilée concernant la constance de l'accélération de la chute libre ? Défi 264 pe

* *

Il est facile de soulever une masse d'un kilogramme posée sur le sol ou sur une table. Vingt kilogrammes sont plus difficiles. Un millier est impossible. Cependant, $6 \cdot 10^{24}$ kg est réalisable. Pourquoi ? Défi 265 s

* *

Le rapport entre les forces des marées de la Lune et du Soleil est approximativement 7 : 3. Est-il vrai que c'est aussi le rapport entre les masses volumiques des deux corps ? Défi 266 pe

* *

Le frottement entre la Terre et la Lune ralentit la rotation de chacune. La Lune a cessé de tourner sur elle-même il y a plusieurs millions d'années, et la Terre est sur la bonne voie pour en faire autant. Lorsque la Terre cessera de tourner, la Lune arrêtera de s'éloigner de la Terre. À quelle distance de la Terre la Lune se trouvera-t-elle à ce moment-là ? Par la suite pourtant, dans un futur bien plus lointain, La Lune se rapprochera à nouveau de la Terre, à cause des frottements entre le système Terre–Lune et le Soleil. Ce phénomène ne se produira que si le Soleil brille pour toujours, ce qui est faux, mais pouvez-vous malgré tout expliquer cela ? Défi 267 pe Défi 268 s

* *

Lorsque vous courez en direction de l'est, vous *perdez du poids*. Il y a deux explications distinctes : l'accélération « centrifuge » augmente de telle sorte que la force avec laquelle vous êtes tiré vers le bas diminue, et la force de Coriolis apparaît, avec un résultat ana-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 269 pe logue. Pouvez-vous quantifier l'importance des deux effets ?

* *

Quel est le rapport des périodes entre une pierre tombant d'une distance l et un pendule
Défi 270 s se balançant le long de la moitié d'un cercle de rayon l ? (Ce problème a été posé par Galilée.) Combien de chiffres du nombre π pouvons-nous espérer déterminer de cette manière ?

* *

Pourquoi un vaisseau spatial peut-il accélérer grâce à l'*effet de fronde gravitationnelle* (ou *effet catapulte*) lorsqu'il fait le tour d'une planète, en dépit de la conservation de la quan-
Défi 271 s tité de mouvement ? Il est conjecturé que le même effet est aussi responsable de l'exis-
Réf. 98 tence des quelques astres exceptionnellement rapides qui sont observés dans la Galaxie. Par exemple, l'étoile HE0457-5439 se déplace à 720 km/s, ce qui est nettement supérieur aux 100 à 200 km/s de la plupart des étoiles dans la Voie lactée. Il semble que ce rôle de centre d'accélération soit occupé par un trou noir.

* *

Réf. 99 L'orbite d'une planète autour du Soleil possède de nombreuses propriétés captivantes. Quel est l'hodographe de cette orbite ? Quels sont les hodographes des orbites parabo-
Défi 272 s liques et hyperboliques ?

* *

Une question élémentaire mais ardue : si tous les corps s'attirent les uns les autres, pourquoi toutes les étoiles ne tombent-elles pas ou ne sont-elles pas déjà tombées les unes
Défi 273 s vers les autres ?

* *

L'accélération g due à la gravité à une profondeur de 3 000 km est de 10,05 m/s^2, plus
Réf. 115 de 2 % supérieure à celle de la surface de la Terre. Comment est-ce possible ? De même, sur le plateau tibétain, g est plus élevé que la valeur au niveau de la mer de 9,81 m/s^2, bien que le plateau soit plus éloigné du centre de la Terre que ne l'est le niveau de la mer.
Défi 274 s Comment est-ce possible ?

* *

Quand la Lune fait le tour du Soleil, sa trajectoire a-t-elle des segments *concaves* en direction du Soleil, comme le montre la partie droite de la Figure 87, ou non, comme indiqué
Défi 275 s sur la gauche ? (Indépendamment de ce problème, les deux trajectoires sur le schéma masquent le fait que la trajectoire de la Lune ne se situe *pas* dans le même plan que celui de la trajectoire de la Terre autour du Soleil.)

* *

Vous pouvez démontrer que des objets *s'attirent les uns les autres* (et qu'ils ne sont pas seulement attirés par la Terre) à l'aide d'une simple expérience que n'importe qui peut réaliser chez lui, comme décrit sur le site Web http://www.fourmilab.ch/gravitation/foobar/.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

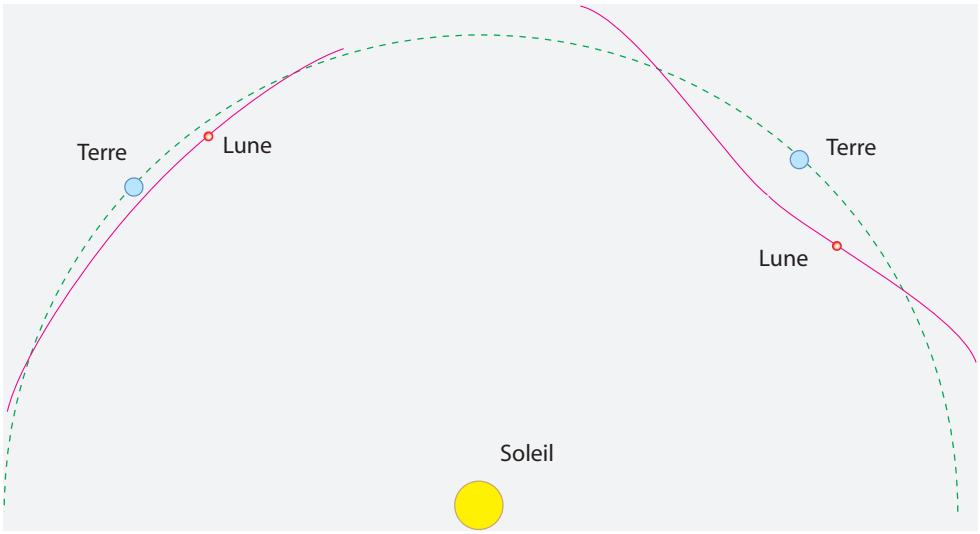


FIGURE 87 Laquelle de ces deux trajectoires de la Lune est-elle correcte ?

* *

Il est instructif de calculer la *vitesse d'échappement* sur la Terre, c'est-à-dire la vitesse à laquelle un corps doit être lancé pour qu'il ne retombe jamais. Elle se révèle être de 11 km/s. Quelle est la vitesse d'échappement pour le Système solaire ? Par ailleurs, la vitesse d'échappement de notre Galaxie est de 129 km/s. Que se passerait-il si une planète ou un système était si lourd que sa vitesse d'échappement serait plus importante que la vitesse de la lumière ?

Défi 276 s

* *

Pour des corps de forme irrégulière, le centre de gravité d'un corps n'est *pas* identique au centre de masse. Êtes-vous capable de confirmer cela ? (Conseil : trouvez et faites usage de l'exemple le plus simple possible.)

Défi 277 s

* *

La gravité peut-elle produire de la répulsion ? Qu'est-ce qui se passe pour un petit corps situé à l'intérieur d'une grande masse en forme de C ? Est-il poussé en direction du centre de masse ?

Défi 278 pe

* *

La *forme* de la Terre n'est pas une sphère. Par conséquent, un fil à plomb n'indique généralement pas la direction du centre de la Terre. Quel est le plus grand écart en degrés ?

Réf. 116
Défi 279 pe

* *

Quel est le plus grand astéroïde duquel nous pouvons nous échapper simplement en sautant ?

Défi 280 s

* *

Si vous observez le ciel chaque jour à 6 heures du matin, la position du Soleil change au

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 88 L'analemme au-dessus de Delphes entre janvier et décembre 2002. (© Anthony Ayiomamitis)

cours de l'année. Le résultat de la Figure 88 montre le Soleil ainsi photographié sur la même image. La courbe, appelée analemme, est due à l'inclinaison de l'axe de la Terre, ainsi qu'à la forme elliptique de la trajectoire autour du Soleil. La forme de l'analemme est également reconstruite dans les cadrans solaires de haute qualité. Les points supérieur et inférieur (caché) correspondent aux solstices.

* *

La constellation (groupement d'étoiles) dans laquelle le Soleil reste à midi (au centre du fuseau horaire) un jour donné est supposée être le « signe zodiacal » de ce jour-là. Les astrologues affirment qu'ils sont au nombre de douze, à savoir Bélier, Taureau, Gémeaux, Cancer, Lion, Vierge, Balance, Scorpion, Sagittaire, Capricorne, Verseau et Poissons et que chacun occupe (assez précisément) un douzième d'une année ou un douzième de l'écliptique. N'importe quelle vérification à l'aide d'un calendrier indique qu'en ce moment le Soleil de midi n'est jamais dans le signe zodiacal qui est normalement associé à ces jours-là. L'association a été décalée d'environ un mois depuis qu'elle fut définie, à cause de la précession de l'axe de la Terre. Une vérification avec une carte de la voûte céleste montre que les douze constellations n'ont pas la même longueur et que, sur l'écliptique, il y en a quatorze et non pas douze. Il y a *Ophiuchus*, la constellation du Serpentaire, entre le Scorpion et le Sagittaire, et *Cetus*, la Baleine, entre le Verseau et les Poissons. En réalité, aucune formulation astronomique concernant les signes du Zodiaque n'est correcte. Pour le dire clairement, l'astrologie, contrairement à son appellation, n'est *pas* relative aux astres. (Dans certaines langues, le terme qui signifie « charlatan » est dérivé

Page 103
Réf. 117

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

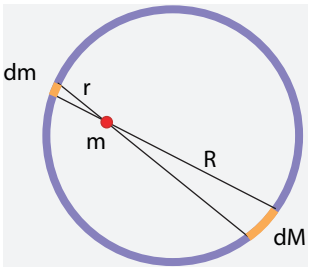


FIGURE 89 L'annulation de la force gravitationnelle à l'intérieur d'une coquille sphérique de matière.

du mot « astrologue ».)

* *

L'accélération gravitationnelle pour une particule située à l'intérieur d'une coquille
Réf. 118 sphérique est nulle. L'annulation de la gravité dans ce cas est indépendante de la forme de la particule et de sa position, et indépendante de l'épaisseur de la coquille. Pouvez-
Défi 281 s vous établir cette affirmation en utilisant la Figure 89 ? Cela est vrai uniquement à cause de la dépendance en $1/r^2$ de la gravité. Pouvez-vous montrer que ce résultat ne s'applique pas pour des coquilles non sphériques ? Remarquez que l'annulation de la gravité à l'intérieur d'une coquille sphérique ne s'applique généralement pas s'il y a de la matière située à l'extérieur de la coquille. Comment pouvons-nous annihiler les effets de la ma-
Défi 282 s tière extérieure ?

* *

Pendant longtemps, on a pensé qu'il n'y avait aucune planète supplémentaire au-delà de
Réf. 119 Neptune et Pluton dans notre Système solaire, parce que leur orbite n'indiquait aucune perturbation due à un autre corps. Aujourd'hui, l'opinion est différente. Il s'avère qu'il y a seulement huit planètes : Pluton n'est pas une planète, mais le premier objet d'un ensemble de petits astres plus éloignés que les planètes, situés dans la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort. (Les astronomes ont malgré tout consenti à continuer d'appeler Pluton « planète » en dépit de cette évidence, pour éviter d'avoir à en débattre*.) Des objets sont régulièrement découverts dans la ceinture de Kuiper. En 2003, on a trouvé un objet, appelé *Sedna*, qui est presque aussi grand que Pluton mais trois fois plus éloigné du
Réf. 120 soleil**.

* *

En astronomie, on découvre périodiquement de nouveaux exemples de corps en mouvement, même au siècle présent. Parfois il s'agit aussi de fausses alertes. Un exemple fut la prétendue chute de *minuscules comètes* sur la Terre. Elles étaient censées être constituées

* Le débat a finalement eu lieu en août 2006, lors d'une assemblée générale à Prague : les 2 500 astronomes de l'Union Astronomique Internationale ont relégué Pluton au rang de « planète naine ». [N.D.T.]

** On découvre continuellement des nouveaux corps, mais Sedna a joué un rôle particulier dans la prise de conscience des astronomes de l'urgence d'une définition claire d'une planète. C'est devenu criant lorsqu'on a détecté Éris sur des photographies, en janvier 2005, un astre qui se révèle être plus gros que Pluton. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de quelques douzaines de kilogrammes de glace, frappant la Terre toutes les quelques
Réf. 121 secondes. Il est dorénavant établi que cela ne se produit pas. D'un autre côté, il est vrai que plusieurs tonnes d'astéroïdes chutent sur Terre chaque jour, sous la forme de particules minuscules. Malheureusement, la découverte d'objets pouvant potentiellement frapper la Terre n'est pas du tout évidente. Les astronomes aiment à souligner qu'un astéroïde aussi massif que celui qui a provoqué l'extinction des dinosaures pourrait frapper la Terre sans qu'aucun astronome ne le remarque à l'avance, si sa direction est quelque peu exceptionnelle, comme depuis l'hémisphère Sud, où les télescopes installés sont peu nombreux.

* *

La gravitation universelle n'autorise que des orbites elliptiques, paraboliques ou hyperboliques. Il est impossible pour un petit objet s'approchant d'un autre plus gros d'être capturé par celui-ci. Pour le moins, c'est ce que nous en savons jusqu'à présent. Pourtant, tous les livres d'astronomie racontent des histoires de capture dans notre Système solaire. Par exemple, plusieurs satellites externes de Saturne ont été capturés. Comment
Défi 283 s est-ce possible ?

* *

Quelle forme un tunnel devrait-il avoir pour qu'une pierre le traverse en tombant sans toucher les parois ? (On suppose que la densité est homogène.) Si la Terre ne tournait pas, le tunnel serait en ligne droite et traverserait son centre, et la pierre tomberait vers le bas et remonterait sans cesse, dans un mouvement d'oscillation. Pour une Terre en rotation, le problème est beaucoup plus épineux. Quelle est cette forme sachant que le
Défi 284 s tunnel commence à l'équateur ?

* *

La Station spatiale internationale fait le tour de la Terre toutes les 90 minutes à une altitude d'environ 380 km. Vous pouvez observer sa position sur le site Web http://www.heavens-above.com. Par ailleurs, à chaque fois qu'elle se situe juste au-dessus de l'horizon, la station est le troisième objet le plus lumineux dans le ciel nocturne, devancé
Défi 285 e uniquement par la Lune et Vénus. Jetez-y un coup d'œil.

* *

Est-il vrai que le centre de masse du Système solaire, son barycentre, est constamment
Défi 286 s situé à l'intérieur du Soleil ? Même si une étoile ou le Soleil ne se déplace que très peu lorsque des planètes tournent autour, ce mouvement peut être mesuré avec précision en
Page 26 faisant usage de l'effet Doppler des ondes lumineuses ou sonores. Jupiter, par exemple, produit une variation de vitesse de 13 m/s dans le Soleil, la Terre 1 m/s. Les premières planètes en dehors du Système solaire, aux environs du pulsar PSR1257+12 et de l'étoile 51 Pegasi, ont été découvertes de cette manière, en 1992 et 1995. Depuis ce temps, plus de 150 planètes ont été découvertes à l'aide de cette méthode. Jusqu'à présent, la plus petite planète découverte a 7 fois la masse de la Terre.

* *

Tous les points sur la Terre ne reçoivent pas le même nombre d'heures de lumière du

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

jour pendant une année. Les effets sont difficiles à identifier, cependant pouvez-vous en relever un ? Défi 287 d

* *

Les phases de la Lune peuvent-elles avoir un effet mesurable sur le corps humain ? Qu'en est-il des effets dus aux marées lunaires ? Défi 288 s

* *

Il y a une différence essentielle entre le système héliocentrique et l'ancienne idée que toutes les planètes tournaient autour de la Terre. Le système héliocentrique établit que certaines planètes, telles que Mars et Vénus, peuvent se trouver *entre* la Terre et le Soleil à certaines périodes, et *derrière* le Soleil à d'autres moments. A contrario, le système géocentrique affirme qu'elles sont toujours situées entre. Pourquoi un différend si important ne remit-il pas immédiatement en cause le système géocentrique ? Défi 289 s

* *

La reformulation la plus énigmatique de la description du mouvement exprimée par $m\mathbf{a} = \nabla U$ est l'équation suivante qui paraît presque insensée : Réf. 122

$$\nabla v = \mathrm{d}\mathbf{v}/\mathrm{d}s \tag{47}$$

où s représente la longueur de la trajectoire du mouvement. Elle est appelée *formulation par rayon* des équations du mouvement de Newton. Pouvez-vous découvrir des exemples de son application ? Défi 290 s

* *

Vue depuis Neptune, la taille du Soleil est la même que celle de Jupiter vue depuis la Terre au moment où elle est le plus proche. Est-ce vrai ? Défi 291 s

* *

Qu'est-ce que la gravité ? Ce n'est pas une question triviale. En 1690, Nicolas Fatio de Duillier et, en 1747, Georges Louis Lesage suggérèrent une explication pour la dépendance en $1/r^2$. Lesage argumenta que le monde est empli de petites particules – il les appela des « corpuscules ultramondains » – voltigeant partout de manière aléatoire et heurtant tous les objets. Des objets ordinaires ne ressentent pas ces coups, puisqu'ils sont continuellement frappés au hasard dans toutes les directions. Mais lorsque deux objets sont proches l'un de l'autre, ils se font de l'ombre pour la partie du flux qui provient de la direction de l'autre corps, avec pour résultat une attraction. Pouvez-vous montrer qu'une telle attraction possède une dépendance en $1/r^2$? Réf. 123 Défi 292 pe

Toutefois, la proposition de Lesage pose un certain nombre de difficultés. Cette hypothèse ne fonctionne que si les collisions sont inélastiques. (Pourquoi ?) Cependant, cela signifierait que tous les corps se réchaufferaient au cours du temps, comme Jean-Marc Lévy-Leblond l'a expliqué. Réf. 3

Il y a deux problèmes supplémentaires avec la suggestion de Lesage. Premièrement, un corps libre de tout mouvement dans l'espace devrait être touché par un plus grand nombre de particules, ou par des particules plus rapides, à l'avant qu'à l'arrière. Par

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

conséquent, le corps devrait être ralenti. Deuxièmement, la gravité devrait dépendre de la taille, mais d'une manière étrange. En particulier, trois corps se trouvant le long d'une droite ne devraient *pas* se faire de l'ombre, puisqu'une telle ombre n'est pas observée. Mais ce modèle naïf prédit le contraire.

Malgré toutes les critiques, cette célèbre idée revient régulièrement sur la table en physique depuis son apparition, même si de telles particules n'ont jamais été détectées. Ce n'est que dans la troisième partie de notre escalade de la montagne que nous résoudrons cette question.

* *

Défi 293 pe Pour quels corps la gravité décroît-elle lorsque vous vous en approchez ?

* *

Pouvons-nous mettre un satellite en orbite en utilisant un canon ? La réponse dépend-
Défi 294 pe elle de la direction dans laquelle nous tirons ?

* *

Deux informaticiens partagent leur expérience. « J'ai balancé mon Pentium III et mon Pentium IV par la fenêtre. » « Et alors ? » « Le Pentium III était plus rapide. »

* *

À quelle fréquence la Terre se lève-t-elle et se couche-t-elle lorsqu'elle est vue depuis la
Défi 295 s Lune ? La terre montre-t-elle des phases ?

* *

Défi 296 pe Quel est le poids de la Lune ? Quelle est sa proportion par rapport au poids des Alpes ?

* *

En raison du léger aplatissement de la forme de la Terre, la source du Mississippi est à peu près 20 km plus proche du centre de la Terre que son embouchure. L'eau coule
Défi 297 s effectivement en courant ascendant. Comment est-ce possible ?

* *

Si un astre est constitué de matière de haute densité, la vitesse d'une planète orbitant autour de lui peut être plus grande que celle de la lumière. Comment la nature fait-elle
Défi 298 s pour esquiver cette étrange possibilité ?

* *

Qu'adviendra-t-il du Système solaire à l'avenir ? Cette interrogation est étonnamment difficile à résoudre. Le principal spécialiste de cette question, le scientifique français des systèmes planétaires Jacques Laskar, a simulé quelques centaines de millions d'années
Réf. 124 d'évolution à l'aide de calculs numériques réalisés sur des ordinateurs. Il découvrit que
Page 279 les orbites planétaires sont stables, mais qu'à petite échelle le chaos se manifeste dans l'évolution du Système solaire. Les diverses planètes s'influencent entre elles de manière subtile mais toujours mal comprise. Les effets qui ont eu lieu par le passé sont toujours en cours d'étude, comme la variation d'énergie de Jupiter, due au fait qu'il provoqua

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 19 Une propriété inexpliquée de la nature : les distances des planètes et les valeurs données par la loi de Titius–Bode.

PLANÈTE	n	DISTANCE EN UA	
		PRÉDITE	MESURÉE
Mercure	$-\infty$	0,4	0,4
Vénus	0	0,7	0,7
Terre	1	1,0	1,0
Mars	2	1,6	1,5
Planétoïdes	3	2,8	2,2 à 3,2
Jupiter	4	5,2	5,2
Saturne	5	10,0	9,5
Uranus	6	19,6	19,2
Neptune	7	38,8	30,1
Pluton	8	77,2	39,5

l'expulsion de petits astéroïdes du Système solaire, ou comme l'acquisition d'énergie par Neptune. Il reste beaucoup de recherches à faire dans ce domaine.

* *

Un des problèmes non résolus sur le Système solaire est l'explication de la distance des planètes découverte en 1766 par Johann Daniel Titius (1729–1796) et diffusée par Johann Elert Bode (1747–1826). Titius découvrit que les distances d des planètes au Soleil peuvent être approchées par

$$d = a + 2^n b \quad \text{avec} \quad a = 0{,}4\,\text{UA}\,,\ b = 0{,}3\,\text{UA} \tag{48}$$

où les distances sont mesurées en unités astronomiques et n est le numéro de la planète. L'approximation qui en résulte est comparée aux observations dans le Tableau 19.

De façon intéressante, les trois dernières planètes ainsi que les planétoïdes furent découverts *après* la mort de Bode et de Titius. La loi a prédit la distance d'Uranus avec succès, de même que celle des planétoïdes. Malgré ces réussites – et l'échec pour les deux dernières planètes – personne n'a encore trouvé de modèle pour la formation des planètes qui explique la loi de Titius. Les gros satellites de Jupiter et d'Uranus sont régulièrement espacés, mais ne s'accordent pas avec la loi de Titius–Bode.

Démontrer ou réfuter cette loi est un des défis qui demeurent en mécanique clas-
Réf. 125 sique. Quelques chercheurs soutiennent que cette loi est une conséquence de l'invariance
Réf. 126 d'échelle, d'autres affirment que c'est un hasard ou même une diversion. Cette dernière interprétation est également suggérée par le comportement contraire à la loi de Titius–Bode de pratiquement toutes les planètes extrasolaires. Le débat n'est pas clos.

* *

Il y a environ 3 000 ans, les Babyloniens avaient mesuré les périodes orbitales des sept

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 20 Les périodes orbitales connues des Babyloniens.

ASTRE	PÉRIODE
Saturne	29 a
Jupiter	12 a
Mars	687 j
Soleil	365 j
Vénus	224 j
Mercure	88 j
Lune	29 j

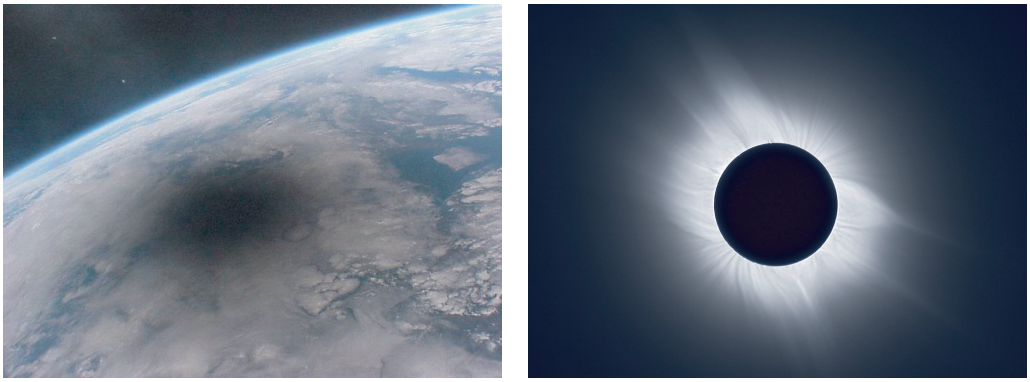


FIGURE 90 Une éclipse solaire (11 août 1999, photographiée depuis la station russe Mir).

corps célestes connus à l'époque. Ordonnés de la plus longue période à la plus courte, ils les écrivirent comme dans le Tableau 20.

Les Babyloniens introduisirent également la semaine et la division de la journée en 24 heures. Ils avaient dédié chacune des 168 heures de la semaine à un corps céleste, en suivant l'ordre du tableau. Ils avaient également dédié la journée entière au corps céleste qui correspondait à la première heure de ce jour-là. Le premier jour de la semaine était voué à Saturne, la disposition des autres jours de la semaine suivait alors le Tableau 20. Cette histoire fut contée par Cassus Dio (v. 160 à v. 230). Vers la fin de l'Antiquité, la disposition fut modifiée par l'Empire romain. Dans les langues germaniques, incluant l'anglais, les noms latins des corps célestes furent remplacés par les dieux germains correspondants. L'ordre samedi, dimanche, lundi, mardi, mercredi, jeudi et vendredi est donc une conséquence à la fois de relevés astronomiques et de croyances astrologiques de la part des Anciens.

Défi 299 e

Réf. 127

* *

En 1722, le grand mathématicien Leonhard Euler commit une erreur dans ses calculs qui le conduisit à conclure que, si un tunnel était construit d'un pôle de la Terre à l'autre, une pierre tombant à l'intérieur atteindrait le centre de la Terre, se retournerait alors immédiatement et rebrousserait chemin. Voltaire tourna en dérision cette conclusion durant

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

plusieurs années. Pouvez-vous corriger Euler et montrer que le véritable mouvement est une oscillation entre les deux pôles, et pouvez-vous évaluer le temps de chute de pôle à pôle que cela prendrait (en supposant la densité homogène) ?

Défi 300 s

Quelle serait la période d'oscillation pour un tunnel droit de longueur l à partir d'un point quelconque de la surface au point opposé sur le globe, n'allant *pas* de ce fait d'un pôle à l'autre ?

Défi 301 s

* *

La Figure 90 montre une photographie de l'éclipse solaire de 1999 prise par la station spatiale russe *Mir*. Elle indique clairement que le point de vue général d'un phénomène peut être complètement différent de celui qui est local. Quelle est la vitesse de l'ombre ?

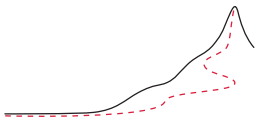
Défi 302 s

* *

En 2005, des mesures par satellites ont mis en évidence le fait que l'eau dans le fleuve Amazone exerce une pression sur le terrain allant jusqu'à 75 mm de plus pendant la saison où il est en crue que pendant la saison où il est presque vide.

Réf. 128

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 7

LA MÉCANIQUE CLASSIQUE ET LA PRÉDICTIBILITÉ DU MOUVEMENT

Tous les types de mouvement dans lesquels on peut décrire la masse d'un corps comme étant sa seule propriété invariable forment ce qui est appelé la *mécanique*. La dénomination « mécaniciens » est aussi attribuée aux spécialistes qui étudient ce domaine de la physique. Nous pouvons imaginer la mécanique comme étant la branche athlétique de la physique* : à la fois en athlétisme et en mécanique les longueurs, les temps et les masses sont les seules quantités mesurées.

Plus précisément, notre domaine d'investigation actuel est appelé la mécanique *classique*, pour la distinguer de la mécanique *quantique*. La principale différence est qu'en physique classique des valeurs arbitrairement petites sont présumées exister, alors que ce n'est pas le cas en mécanique quantique. L'utilisation de nombres réels pour les quantités observables est donc primordiale en physique classique.

La mécanique classique est également régulièrement appelée *physique galiléenne* ou *physique newtonienne*. Le fondement de la mécanique classique, la description du mouvement en utilisant uniquement l'espace et le temps, est appelé la *cinématique*. Un exemple en est la description de la chute libre par $z(t) = z_0 + v_0(t-t_0) - \frac{1}{2}g(t-t_0)^2$. Le reste, partie majeure de la mécanique classique, est la description du mouvement comme une conséquence des interactions entre les corps. Elle est nommée la *dynamique*. Une illustration de la dynamique est la formule de l'attraction universelle.

La distinction entre la cinématique et la dynamique peut aussi être faite en relativité, en thermodynamique et en électrodynamique. Même si nous n'avons pas encore exploré ces domaines d'investigation, nous savons qu'il n'y a pas que la gravitation dans l'Univers. Une observation élémentaire permet de trancher : le frottement. Le frottement ne peut pas être causé par la gravité, parce qu'il n'est pas observé dans les cieux, où le mouvement suit uniquement les lois gravitationnelles**. Qui plus est, sur Terre, le frottement est indépendant de la gravité, comme vous avez probablement déjà pu l'expérimenter. Il doit exister une autre interaction responsable du frottement. Nous allons bientôt l'étudier. Mais un sujet complémentaire mérite une explication tout de suite.

Défi 303 e

* Ceci est en contradiction avec la véritable provenance du terme « mécanique », qui signifie « science des machines ». Il dérive du grec μηκανή, qui signifie « machine » et qui se trouve même être à l'origine du mot français « machine » lui-même. Quelquefois, le terme « mécanique » est utilisé pour l'étude du mouvement des corps *solides* uniquement, excluant par exemple l'hydrodynamique. Cet usage eut la faveur des physiciens durant le siècle passé.

** Ce n'est pas parfaitement exact : dans les années 1980, le premier cas de frottement gravitationnel fut révélé : l'émission des ondes gravitationnelles. Nous discuterons de ceci en détail plus tard.

Page 154

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Devrait-on employer la force ?

> « L'usage direct de la force est une solution si misérable pour résoudre n'importe quel problème, qu'elle est en général employée uniquement par les petits enfants et par les grandes nations. »
>
> David Friedman

Tout le monde doit prendre position sur cette question, même les étudiants en physique. En fait, plusieurs sortes de forces sont utilisées et observées dans la vie quotidienne. Nous voulons parler des forces musculaire, gravitationnelle, spirituelle, sexuelle, maléfique, supernaturelle, sociale, politique, économique et de nombreuses autres. Les physiciens voient les choses plus simplement. Ils nomment *interactions* les différents types de forces observés entre des objets. L'étude minutieuse de toutes ces interactions nous montrera que, dans la vie courante, elles sont d'origine électrique.

Pour les physiciens, tout changement est causé par le mouvement. Le mot force prend alors également une définition plus restrictive. La *force (physique)* est définie comme étant la *variation de la quantité de mouvement*, c'est-à-dire comme

$$\mathbf{F} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} \,. \tag{49}$$

La force est le changement ou flux de la quantité de mouvement. Si une force agit sur un corps, la quantité de mouvement circule vers celui-ci. De fait, la quantité de mouvement peut être imaginée comme étant un certain liquide invisible et impalpable. La force mesure quelle quantité de ce liquide s'écoule depuis un corps vers un autre par unité de temps.

En utilisant la définition galiléenne de la quantité de mouvement de translation $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, nous pouvons réécrire la définition de la force (pour une masse constante) comme

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \,, \tag{50}$$

où $\mathbf{F} = \mathbf{F}(t, \mathbf{x})$ est la force agissant sur un objet de masse m et où $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t, \mathbf{x}) = \mathrm{d}\mathbf{v}/\mathrm{d}t = \mathrm{d}^2\mathbf{x}/\mathrm{d}t^2$ est l'accélération du même objet, c'est-à-dire sa variation de vitesse*.

Cette expression établit en termes précis que la force est ce qui modifie la *vitesse* des masses. La quantité est appelée « force » parce qu'elle correspond à de nombreux aspects de la force musculaire, mais *pas* tous. Par exemple, plus la force est importante, plus une pierre peut être lancée loin.

Cependant, à chaque fois que la notion de force sera employée, nous devrons nous souvenir que *la force physique est différente de la force ordinaire ou de l'effort courant.*

* Cette équation fut écrite ainsi pour la première fois par le mathématicien et physicien suisse Leonhard Euler (1707–1783) en 1747, plus de 70 ans après la première loi de Newton et 20 ans après le décès de celui-ci, et à qui elle est généralement attribuée par erreur. C'était Euler, et non pas Newton, qui comprit le premier que cette définition de la force est fonctionnelle dans *tous* les cas où il y a du mouvement, quelles qu'en soient les apparences, qu'il s'agisse de particules ponctuelles ou d'objets étendus, et qu'il s'agisse de corps rigides, déformables ou fluides. De façon surprenante et contrairement aux affirmations qui sont faites régulièrement, l'équation (50) est toujours valide en relativité, comme indiqué à la page 71.

Réf. 24

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 21 Quelques valeurs mesurées de force.

OBSERVATION	FORCE
Valeur de force mesurée dans un microscope à résonance magnétique	820 zN
Force maximale exercée par des dents	1,6 kN
Force typique exercée par une massue	2 kN
Force exercée par des quadriceps	jusqu'à 3 kN
Force éprouvée par un excellent adhésif de 1 cm^2	jusqu'à 10 kN
Force nécessaire pour sectionner une bonne corde utilisée pour l'escalade	30 kN
Force maximale mesurable dans la nature	$3{,}0 \cdot 10^{43}$ N

L'effort est probablement la meilleure approximation du concept de *puissance (physique)*, généralement notée P, et définie (pour une force constante) comme

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \tag{51}$$

dans laquelle le *travail (physique)* W est défini comme étant $W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$. Le travail physique est une forme d'énergie, comme vous pouvez le vérifier. Remarquez qu'un homme qui marche en portant un sac à dos très lourd réalise cet effort avec beaucoup de peine. Donc pourquoi se sent-il si fatigué ? Le travail, comme toute forme d'énergie, doit être pris en considération quand on cherche à vérifier la conservation de l'énergie.

Défi 304 s

Avec la définition du travail donnée ci-dessus, vous pouvez résoudre les énigmes suivantes. Qu'arrive-t-il à la consommation électrique d'un escalier roulant si vous marchez dessus au lieu de rester debout immobile ? Quelle est l'incidence de la définition du travail sur le salaire des scientifiques ?

Défi 305 s

Défi 306 d

Lorsque des étudiants en examen disent que la force agissant sur une pierre lancée est moindre au point le plus haut de la trajectoire, on a coutume de répondre qu'ils utilisent un point de vue erroné, à savoir la *vision aristotélicienne*, dans laquelle la force est proportionnelle à la vitesse. De temps à autre il est même dit qu'ils utilisent un concept différent de l'*état* de mouvement. La critique accentue alors, avec un air de supériorité, le fait que cela est faux. C'est une image typique de la méconnaissance intellectuelle. Chaque étudiant sait, en faisant du vélo, en jetant une pierre ou en tirant un objet, que l'augmentation de l'effort produit une augmentation de la vitesse. Les étudiants ont raison, tous les théoriciens qui en déduisent que ces étudiants ont une conception erronée de la *force* ont tort. En réalité, à la place du concept *physique* de la force, l'élève utilise simplement la version *quotidienne*, à savoir l'effort. De ce fait, l'effort exercé par la gravité sur une pierre en vol est moindre au point le plus haut de la trajectoire. Bien saisir la différence entre la force physique et l'effort quotidien est la principale embûche dans l'apprentissage de la mécanique*.

Réf. 129

* Ce palier est si élevé que de nombreux physiciens professionnels ne l'ont jamais réellement franchi eux-mêmes. Ceci est confirmé par les innombrables commentaires dans les articles qui proclament que la force physique est définie d'après la masse, et, en même temps, que la masse est définie en utilisant la force (la dernière partie de la phrase étant une erreur fondamentale).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Régulièrement, le flux de la quantité de mouvement, l'équation (49), n'est pas reconnu comme étant la définition de la force. C'est dû principalement à une observation courante : il semble y avoir des forces sans aucune accélération associée, ou variation dans la quantité de mouvement, comme dans une corde sous tension ou dans de l'eau à haute pression. Lorsque nous nous appuyons contre un arbre, il n'y a aucun mouvement, bien qu'une force soit appliquée. Si la force est l'écoulement de la quantité de mouvement, où celle-ci va-t-elle ? Elle se répartit dans les minuscules déformations des bras et de l'arbre. En fait, quand nous commençons à pousser et donc à déformer, la variation associée de la quantité de mouvement des molécules, des atomes ou des électrons des deux corps peut être mise en évidence. Après que la déformation est établie, et en regardant sous un grossissement encore plus important, nous pouvons effectivement constater qu'un flux de quantité de mouvement continu et équivalent se propage dans les deux directions. La nature de cet écoulement sera élucidée dans la partie sur la théorie quantique.

Puisque la force est le flux net de la quantité de mouvement, elle est nécessaire comme concept distinct seulement dans la vie quotidienne, où elle est utile dans des situations où les flux nets de la quantité de mouvement sont inférieurs aux flux totaux. À l'échelle microscopique, la quantité de mouvement seule est suffisante pour la description du mouvement. Par exemple, la notion de *poids* décrit la circulation de la quantité de mouvement due à la gravité. Ainsi nous n'utiliserons presque jamais le mot « poids » dans la partie microscopique de notre aventure.

À travers sa définition, le concept de force est clairement distinct de la « masse », de la « quantité de mouvement », de l'« énergie » et de la « puissance ». Mais où les forces trouvent-elles leur origine ? En d'autres termes, quels effets dans la nature ont la capacité d'accélérer des corps en puisant de la quantité de mouvement dans des objets ? Le Tableau 22 en donne un aperçu.

Chaque exemple de mouvement, de celui qui nous permet de choisir la direction de notre regard à celui qui transporte un papillon à travers un paysage bucolique, peut être classé dans l'une des deux colonnes de gauche du Tableau 22. D'un point de vue physique, les deux colonnes sont séparées par le critère suivant : dans le premier ensemble, l'accélération d'un corps peut être dirigée dans une direction différente de sa vitesse. Le second ensemble d'exemples ne produit que des accélérations qui sont exactement *opposées* à la vitesse du corps en mouvement, comme nous pouvons le constater dans le référentiel d'un milieu qui freine. Une telle force de résistance est appelée *frottement*, *force de traînée* ou *amortissement*. Tous les exemples du second ensemble sont des types de frottement. Vérifiez-le.

Défi 308 e

Le frottement peut être si fort que le mouvement d'un corps tout entier par rapport à son environnement est rendu impossible. Ce type de frottement, appelé *frottement statique* ou *frottement d'adhérence*, est familier et important : sans lui, faire tourner les roues des bicyclettes, des trains ou des voitures n'aurait absolument aucun effet. Pas une seule vis ne resterait serrée. Nous ne pourrions pas plus courir ou marcher dans une forêt, puisque le terrain serait encore plus glissant que la glace polie. En réalité, non seulement notre propre mouvement, mais tous les *mouvements volontaires* des êtres vivants sont *fondés* sur le frottement. Le cas est similaire pour les machines qui se déplacent toutes seules. Sans frottement statique, les hélices des navires, des avions et des hélicoptères ne seraient d'aucune utilité et les ailes des avions ne produiraient aucun soulèvement pour les garder dans les airs. (Pourquoi ?) En résumé, le frottement statique est requis toutes

Défi 309 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 22 Sélection de processus et de dispositifs qui modifient le mouvement des corps.

Situations qui peuvent conduire à une accélération	Situations qui conduisent uniquement à une décélération	Moteurs et actionneurs
piézoélectricité		
quartz sous tension électrique	thermoluminescence	trépied piézo en marche
gravitation		
chute	ondes gravitationnelles	poulie
collisions		
satellite tombant vers une planète	accident de voiture	moteur de fusée
extension des montagnes	collision de météorites	nage des larves
effets magnétiques		
aiguille de boussole et aimant	freinage électromagnétique	pistolet électromagnétique
magnétostriction	pertes des transformateurs	moteur linéaire
courant dans un fil et aimant	échauffement électrique	galvanomètre
effets électriques		
peigne frotté près de cheveux	frottement entre solides	moteur électrostatique
bombes	feu	muscles, flagelle du spermatozoïde
tube de téléviseur	microscope électronique	moteur brownien
lumière		
lévitation par la lumière	refroidissement par laser	(véritable) moulin solaire
voiles solaires pour satellites	pression lumineuse (étoiles)	capteur solaire
élasticité		
arc et flèche	bretelles de pantalons	moteur à ultrasons
arbres cambrés qui se redressent	oreiller, airbag	bimorphes
osmose		
sève qui monte dans les arbres	conservation par le sel	pendule osmotique
électro-osmose		projection de rayons X
chaleur & pression		
champagne réfrigéré	résistance d'une planche de surf	pistons hydrauliques
bouilloire	sables mouvants	machine à vapeur
baromètre	parachute	fusil à air comprimé, voilier
séismes	résistance au glissement	sismomètre
appel d'air près d'un train	absorbeurs de chocs	turbine à eau
nucléaire		
radioactivité	s'engouffrer dans le Soleil	explosion d'une supernova
biologie		
croissance du bambou	trouvez ! Défi 307 pe	moteurs moléculaires

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

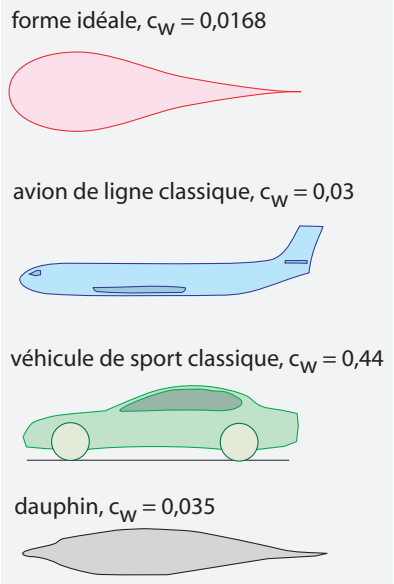


FIGURE 91 Formes et résistance à l'eau et à l'air.

les fois que nous souhaitons nous déplacer relativement à notre environnement.

Une fois qu'un objet se déplace à travers son environnement, il est entravé par un autre type de frottement : le *frottement dynamique*, qui agit sur des corps en mouvement relatif. Sans lui, des corps en chute libre rebondiraient toujours à la même hauteur, sans jamais parvenir à s'arrêter. Ni les parachutes ni les freins ne fonctionneraient ; pire encore, nous n'aurions aucune mémoire, comme nous le verrons plus loin*.

Réf. 130

Puisque les exemples de mouvement de la deuxième colonne du Tableau 22 incluent le frottement, l'énergie macroscopique n'est pas conservée dans ceux-ci : ces systèmes sont *dissipatifs*. Dans la première colonne, l'énergie macroscopique est constante : ces systèmes sont *conservatifs*.

Les deux premières colonnes peuvent également être distinguées l'une de l'autre en utilisant un critère mathématique plus abstrait : sur la gauche se trouvent des accélérations qui peuvent être dérivées d'un potentiel, sur la droite, des décélérations qui ne le peuvent pas. Comme dans le cas de la gravitation, la description de n'importe quelle sorte de mouvement est nettement simplifiée par l'utilisation d'un potentiel : à chaque position dans l'espace, nous n'avons besoin que de l'unique valeur du potentiel pour calculer la trajectoire d'un objet, au lieu des trois nombres de l'accélération ou de la force. Qui plus est, la grandeur de la vitesse d'un objet à n'importe quel point peut être calculée directement à partir de la conservation de l'énergie.

Les processus à l'origine de la seconde colonne *ne peuvent pas* être décrits par un potentiel. Ce sont les cas dans lesquels nous devons nécessairement employer la force si nous voulons décrire le mouvement d'un système. Par exemple, la force F due à la

* Une récente étude suggère qu'il est possible que dans certains systèmes cristallins, tels des éléments en tungstène sur du silicium, dans des conditions idéales, un frottement glissant puisse être extrêmement petit et puisse même disparaître dans certaines directions du mouvement. Ce phénomène, dénommé *superlubrification*, est actuellement un sujet de recherches.

Réf. 131

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

résistance de l'air sur un corps est *approximativement* donnée par

$$F = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \tag{52}$$

où A représente l'aire de sa surface exposée au frottement et v sa vitesse relativement à l'air, ρ est la masse volumique de l'air. Le *coefficient de traînée* c_w est un nombre adimensionnel qui dépend de la forme de l'objet en mouvement. (Quelques exemples en sont donnés dans la Figure 91.) Vous devez vérifier que la résistance aérodynamique ne peut
Défi 311 pe pas être dérivée d'un potentiel*.

Le coefficient de traînée c_w est mesuré expérimentalement comme étant toujours supérieur à 0,0168, qui correspond à un profil aérodynamique optimal. Une voiture aérodynamique a une valeur comprise entre 0,25 et 0,3, mais de nombreux véhicules de sport partagent avec les camionnettes des valeurs de 0,44 et plus**.

La résistance du vent est également importante pour les hommes, en particulier en
Réf. 133 athlétisme. Il est estimé que des sprinteurs du 100 m consacrent entre 3 % et 6 % de leur puissance à surmonter la résistance de l'air. Ceci conduit à des temps de courses t_w va-
Défi 312 pe riables lorsque la vitesse w du vent est impliquée, ils sont associés par la relation

$$\frac{t_0}{t_w} = 1,03 - 0,03 \left(1 - \frac{w t_w}{100}\right)^2 , \tag{53}$$

dans laquelle l'estimation la plus prudente de 3 % est utilisée. Un vent contraire d'une vitesse de −2 m/s provoque un accroissement du temps de 0,13 s, suffisant pour transformer un record mondial potentiel en un résultat « seulement » excellent. (À partir de cette
Défi 313 pe formule êtes-vous capable de déterminer la valeur de c_w pour des coureurs ?)

De façon analogue, le parachutage fonctionne grâce à la résistance de l'air. Pouvez-vous préciser comment la vitesse d'un corps qui chute varie dans le temps, en supposant
Défi 314 s que le coefficient de traînée et la forme sont *constants* ?

A contrario, le frottement statique possède des propriétés différentes. Il est proportionnel à la force qui presse les deux corps l'un contre l'autre. Pourquoi ? En étudiant le
Réf. 134 phénomène plus en détail, nous trouvons que le frottement d'adhérence est proportionnel à la surface réelle de contact. Cela souligne le fait que mettre deux solides en contact est presque identique à prendre la Suisse, à la retourner à l'envers et à la poser contre l'Autriche : la surface de contact est beaucoup plus petite que celle estimée macroscopi-

* Une telle affirmation concernant le frottement n'est exacte qu'en trois dimensions, comme c'est le cas dans
Défi 310 s la nature. Dans le cas d'une unique dimension, un potentiel peut *toujours* être trouvé.

** Calculer les coefficients de traînée à l'aide d'ordinateurs, en donnant la forme du corps en question et les propriétés du fluide, est une des tâches les plus ardues de la science. Le problème n'est toujours pas complètement résolu.

Le thème des formes aérodynamiques est encore beaucoup plus captivant pour des corps fluides. Ceux-ci gardent leur forme grâce à la *tension superficielle*. Par exemple, la tension superficielle laisse les cheveux d'une brosse humide ensemble. La tension superficielle détermine également la forme des gouttes de pluie. Les expériences montrent qu'elle est sphérique pour des gouttes inférieures à 2 mm de diamètre, et que les gouttes de pluie plus grosses sont en forme de *lentille*, avec une partie aplatie vers le bas. Cette forme classique en larme n'est *pas* rencontrée dans la nature, quelque chose de vaguement similaire à celle-ci survient lors
Réf. 132 du détachement de la goutte, mais *jamais* pendant sa chute.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

quement. Le point crucial est que la véritable surface de contact est proportionnelle à la force *normale*. L'analyse de ce qui se passe au niveau de la surface de contact est toujours un sujet actif de recherches, les chercheurs sont en train d'étudier ces problèmes en utilisant des instruments tels que des microscopes à force atomique, des microscopes à force latérale et des triboscopes. Tous ces efforts trouvent des applications dans les disques durs d'ordinateurs qui durent plus longtemps, car le frottement entre le disque et la tête de lecture est une variable essentielle qui détermine la durée de vie.

Toutes les formes de frottement sont accompagnées d'une augmentation de la température du corps en mouvement. La raison devint évidente suite à la découverte des atomes. Le frottement n'est pas observé dans des systèmes ne comportant que quelques particules – par exemple, 2, 3 ou 4. Le frottement apparaît seulement dans les systèmes ayant un grand nombre de particules, généralement de l'ordre de plusieurs millions, voire plus. De tels systèmes sont appelés systèmes *dissipatifs*. Les changements de température et le frottement lui-même sont tous les deux dus au mouvement d'un grand nombre de particules microscopiques les unes contre les autres. Ce mouvement n'est pas intégré dans la description galiléenne. Lorsque c'est le cas, le frottement et la perte d'énergie disparaissent, et des potentiels peuvent alors être employés dans tout ceci. Des accélérations positives – d'ampleur microscopique – apparaissent alors également, et le mouvement se révèle être conservé. Ainsi, tout mouvement est conservatif à un ordre de grandeur microscopique. Par conséquent, à cette échelle, il est possible d'expliquer *tout* mouvement sans le concept de force*. La morale de cette histoire est que nous devrions utiliser la force uniquement dans une situation : dans le cas du frottement, et seulement lorsque nous ne voulons pas plonger dans les détails microscopiques**.

> « Et qu'avons-nous besoin de ce moteur, quand l'étude réfléchie de la nature nous prouve que le mouvement perpétuel est la première de ses lois ?
> Donatien de Sade, *Justine ou Les Malheurs de la vertu*. »

États complets – conditions initiales

> « Quid sit futurum cras, fuge quaerere...*** »
> Horace, *Odi*, lib. I, ode 9, v. 13.

* Le premier scientifique qui élimina la force dans la description de la nature fut Heinrich Rudolf Hertz (n. Hambourg 1857, d. Bonn 1894), le célèbre découvreur des ondes électromagnétiques, dans son manuel de mécanique, *Die Prinzipien der Mechanik*, Barth, 1894, republié par Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1963. Son idée fut fortement critiquée à l'époque, et ce n'est qu'une génération plus tard, lorsque la mécanique quantique se débarrassa sereinement de ce concept une bonne fois pour toutes, que l'idée fut communément admise. (Nombreux sont ceux qui ont spéculé sur le rôle que Hertz aurait pu jouer dans le développement de la mécanique quantique et la relativité générale, s'il n'était pas décédé si jeune.) Dans son livre, Hertz avait également formulé le principe de la trajectoire la plus courte : les particules suivent des géodésiques. Cette description est un des piliers même de la relativité générale, comme nous le verrons plus loin.

** Dans le cas des relations humaines, l'évaluation devrait être quelque peu précisée, comme le montre l'étude menée par James Gilligan. Réf. 135

*** « De quel futur sera fait demain, ne demandez jamais... » Horace est Quintus Horatius Flaccus (65–8 av. J.-C.), le grand poète romain. Réf. 56

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nous décrivons souvent le mouvement d'un corps en précisant la dépendance par rapport au temps de sa position, par exemple comme

$$\mathbf{x}(\mathbf{t}) = \mathbf{x_0} + \mathbf{v_0}(t - t_0) + \tfrac{1}{2}\mathbf{a_0}(t - t_0)^2 + \tfrac{1}{6}\mathbf{j_0}(t - t_0)^3 + \dots . \tag{54}$$

Les variables dotées d'un indice 0, comme la position de départ $\mathbf{x_0}$, la vitesse initiale $\mathbf{v_0}$, etc., sont appelées *conditions initiales*. Des conditions initiales sont nécessaires pour n'importe quelle description du mouvement. Des systèmes physiques distincts ont des conditions initiales différentes. Celles-ci spécifient donc le caractère *exclusif* d'un système donné. Les conditions initiales nous permettent aussi de distinguer la situation actuelle d'un système de celle à n'importe quel instant passé : les conditions initiales précisent les *aspects variables* d'un système. En d'autres termes, elles résument le passé d'un système.

Les conditions initiales sont de cette façon précisément les propriétés que nous avions
Page 25 cherchées pour une description de l'*état* d'un système. Pour trouver une description complète des états, nous avons donc besoin uniquement d'une description complète des conditions initiales. Il apparaît que, pour la gravitation comme pour toutes les autres interactions microscopiques, il n'y a *pas* besoin de l'accélération initiale $\mathbf{a_0}$, du jerk initial $\mathbf{j_0}$ ou de quantités initiales d'ordre plus important. Dans la nature, l'accélération et le jerk dépendent seulement des propriétés des objets et de leur environnement, elles ne dépendent pas du passé. Par exemple, l'expression $a = GM/r^2$, donnant l'accélération d'un petit corps à proximité d'un autre plus grand, ne dépend pas du passé, mais seulement du milieu. La même chose se produit pour les autres interactions fondamentales, comme nous allons bientôt le découvrir.

Page 65 L'*état complet* d'une masse ponctuelle en mouvement est donc précisé en donnant sa position et sa quantité de mouvement à chaque instant du temps. Ainsi nous avons atteint une description complète des propriétés intrinsèques des objets ponctuels, à savoir par leur masse, et de leurs états de mouvement, à savoir par leur quantité de mouvement, leur énergie, leur position dans le temps. Pour les objets rigides *étendus*, nous avons également besoin de l'orientation, de la vitesse angulaire et du moment cinétique. Pouvez-vous préciser les quantités nécessaires dans le cas de corps étendus élastiques ou
Défi 315 pe fluides ?

L'ensemble de tous les états possibles d'un système est désigné par un nom particulier : il est appelé l'*espace des phases*. Nous utiliserons ce concept à plusieurs reprises. Comme tout espace, il possède un nombre de dimensions. Pouvez-vous le trouver pour
Défi 316 s un système comportant N particules ponctuelles ?

Cependant, il y a des situations dans la nature où le mouvement d'un objet dépend de caractéristiques autres que sa masse, le mouvement peut dépendre de sa couleur (pouvez-
Défi 317 s vous trouver un exemple ?), de sa température et de quelques autres propriétés que nous découvrirons bientôt. Pouvez-vous donner un exemple d'une propriété intrinsèque que
Défi 318 s nous avons omise jusqu'à présent ? Et pour chaque propriété intrinsèque il y a des variables d'état à découvrir. Ces nouvelles propriétés sont les fondements du champ de l'investigation physique sous-jacente à la mécanique. Nous devons par conséquent conclure que pour l'instant nous ne sommes pas parvenus à une description complète du mouvement.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Il est intéressant de rappeler un défi plus ancien et de le formuler à nouveau : l'univers a-t-il des conditions initiales ? Possède-t-il un espace des phases ? Comme conseil, rappelez-vous que, lorsqu'une pierre est lancée, les conditions initiales résument les effets du lanceur, son histoire, la manière dont il est arrivé là, etc. ; en d'autres termes, les conditions initiales résument les effets que l'environnement a eus pendant l'histoire d'un système.

Défi 319 s

> « Un optimiste est quelqu'un qui pense que le futur est incertain. »

Les surprises existent-elles ? L'avenir est-il déjà tout tracé ?

> « Die Ereignisse der Zukunft *können* wir nicht aus den gegenwärtigen erschließen. Der Glaube an den Kausalnexus ist ein Aberglaube*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.1361

> « La liberté c'est de savoir reconnaître le nécessaire. »
>
> Friedrich Engels (1820–1895)

Si, après avoir grimpé dans un arbre, nous sautons sur le sol, nous ne pouvons stopper notre saut au milieu de sa trajectoire. Une fois que le saut est commencé, il est inévitable et déterminé, comme tous les mouvements passifs. Pourtant, lorsque nous commençons à bouger un bras, nous pouvons arrêter son mouvement ou transformer une gifle en une caresse. Le mouvement volontaire ne semble pas être inévitable ou prédéterminé. Laquelle de ces deux situations est la plus générale ?

Défi 320 e

Commençons avec l'exemple que nous pouvons décrire le plus précisément possible pour le moment : la chute d'un corps. Une fois que le potentiel φ agissant sur une particule est fixé et pris en compte, en utilisant

$$\mathbf{a}(x) = -\nabla\varphi = -GM\mathbf{r}/r^3 \,, \tag{55}$$

et l'état à un instant donné qui est fourni par les conditions initiales comme

$$\mathbf{x}(t_0) = x_0 \quad \text{et} \quad \mathbf{v}(t_0) = v_0 \,, \tag{56}$$

nous pouvons alors déterminer le mouvement à l'avance. La trajectoire complète $\mathbf{x}(t)$ peut être calculée avec ces deux renseignements. En raison de cette faisabilité, une équation telle que (55) est appelée une *équation d'évolution* pour le mouvement de l'objet. (Remarquez que le mot « évolution » possède une signification différente en physique et en biologie.) Une équation d'évolution exprime toujours l'idée que l'on n'observe pas dans la nature tous les types de changements possibles, mais seulement certaines situations précises. Toutes les successions possibles et imaginables d'événements ne sont pas observées, mais seulement un nombre limité d'entre elles. En particulier, l'équation (55) explicite que, d'un instant au suivant, les objets modifient leur mouvement par le tru-

* « Nous *ne pouvons pas* déduire les événements du futur à partir de ceux du présent. La superstition n'est rien d'autre que la croyance dans les liens de cause à effet. »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

chement du potentiel qui agit sur eux. Donc, en fixant une équation d'évolution et un état initial, le mouvement tout entier d'un système est *fixé de manière unique*. Cette propriété du mouvement est souvent nommée *déterminisme*. Puisque ce terme est familièrement utilisé avec des connotations différentes, distinguons-le prudemment de plusieurs concepts similaires pour éviter tout malentendu.

Le mouvement peut être déterministe et en même temps rester *imprévisible*. Cette dernière caractéristique peut avoir quatre origines : un nombre énorme de particules impliquées qui rend tout calcul inexploitable, la complexité des équations d'évolution, des informations insuffisantes concernant les conditions initiales, et des formes de l'espace-temps qui ne sont pas familières. La prévision météorologique est un exemple où les trois premières conditions sont vérifiées en même temps*. Néanmoins, son mouvement est toujours déterministe. À proximité des trous noirs, les quatre conditions s'appliquent toutes ensemble. Pourtant, à proximité des trous noirs, le mouvement est encore déterministe.

Le mouvement peut être à la fois déterministe et *aléatoire* dans le temps, c'est-à-dire avoir des résultats différents à partir d'expériences identiques. Le mouvement d'une bille de roulette est déterministe, mais est également aléatoire**. Comme nous le verrons plus tard, les situations de la mécanique quantique tombent dans cette catégorie, de même que tous les exemples de mouvements irréversibles, comme une goutte d'encre qui se répand dans de l'eau claire. Dans tous ces cas le hasard et la non-reproductibilité ne sont qu'apparents, ils disparaissent lorsque nous prenons en compte la description des états et des conditions initiales au niveau microscopique. En résumé, le déterminisme n'entre pas en contradiction avec l'*irréversibilité (macroscopique)*. Toutefois, à l'échelle microscopique, le mouvement déterministe est toujours réversible.

Une dernière notion qui doit être discernée du déterminisme est la *non-causalité*. La causalité est l'exigence qu'une cause doit précéder son effet. Cela reste superficiel en physique galiléenne, mais devient primordial en relativité restreinte, dans laquelle la causalité entraîne que la vitesse de la lumière est une limite dans la propagation des effets. En réalité, il semble impossible d'avoir un mouvement déterministe (de matière et d'énergie) qui soit *non causal*, c'est-à-dire plus rapide que la lumière. Pouvez-vous confirmer cela ? Ce sujet sera plus profondément étudié dans la section sur la relativité restreinte.

Défi 321 s

Dire que le mouvement est « déterministe » signifie qu'il est fixé une fois pour toutes dans le futur *mais également dans le passé*. Il est parfois affirmé que des prédictions d'observations *futures* représentent un test décisif pour une description exacte de la nature. En raison de notre capacité fréquente et impressionnante à influencer l'avenir, ce n'est pas forcément un bon test. Toute théorie doit, avant tout, décrire correctement les observations *passées*. C'est notre impuissance à pouvoir modifier le passé qui a pour résultat notre impossibilité de choisir la bonne description de la nature, qui est si centrale en physique. En ce sens, l'expression « situation initiale » est un choix malheureux, parce qu'il nous conduit automatiquement à rechercher la situation initiale de l'univers et

* Pour des images magnifiques de nuages, consultez le site Web http://www.goes.noaa.gov.

** Les mathématiciens ont développé une large palette de tests pour déterminer si un ensemble de nombres peut être qualifié d'*aléatoire*. Les résultats de la roulette passent tous ces tests avec succès – uniquement dans les casinos honnêtes, toutefois. De tels tests vérifient typiquement la distribution identique des nombres, des paires de nombres, des triplets de nombres, etc. D'autres tests sont le test du chi-deux χ^2, le(s) test(s) de Monte Carlo, et le test du gorille.

Réf. 136

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à tenter ainsi de répondre à des questions qui peuvent trouver une réponse sans cette information. Le principal ingrédient d'une description déterministe est que tout mouvement peut être réduit à une équation d'évolution plus un état explicite. Cet état peut aussi bien être initial, intermédiaire ou final. Le mouvement déterministe est défini de manière unique dans le passé et dans le futur.

Pour avoir une idée claire du déterminisme, il est utile de rappeler pourquoi la notion de « temps » s'est immiscée dans notre description du monde. Nous avons introduit le temps parce que nous observons en premier lieu que nous sommes capables de définir des successions dans les observations, et, en second lieu, que le changement sans limites n'existe pas. C'est à l'opposé des films, où un individu peut passer une porte pour ressortir sur un autre continent ou dans un autre siècle. Dans la nature, nous n'observons pas de métamorphoses, comme des individus se transformant en grille-pain ou des chiens en brosses à dents. Nous introduisons le « temps » uniquement parce que les changements successifs que nous observons sont extrêmement restreints. Si la nature n'était pas reproductible, le temps ne pourrait pas être employé. En résumé, le déterminisme exprime l'idée que *des changements successifs ne sont limités à chaque fois qu'à une unique occurrence possible*.

Défi 322 s

Puisque le déterminisme est relié à l'usage de la notion du temps, de nouvelles interrogations surgissent dès que le concept temporel est modifié, comme cela se produit dans la relativité restreinte, en relativité générale et dans la physique théorique des hautes énergies. Ces questions sont très amusantes.

En résumé, chaque description de la nature qui utilise la notion de temps, telles celle de la vie quotidienne, celle de la physique classique et celle de la mécanique quantique, est intrinsèquement et inévitablement déterministe, puisqu'elle relie des observations passées et futures, *bannissant* toute alternative. En bref, *l'usage du temps implique le déterminisme, et vice versa*. Lorsque nous formulons des conclusions métaphysiques, comme il est si familier de nos jours en discutant de la théorie quantique, nous ne devrions jamais oublier cette relation. Quiconque utilise des horloges mais renie le déterminisme entretient une double personnalité* !

Page ??

L'idée que le mouvement est fixé produit souvent de la crainte, parce que nous avons été éduqués pour associer le déterminisme avec un manque de liberté. D'un autre côté, nous faisons l'expérience de la liberté dans nos actions et nous appelons cela le *libre arbitre*. Nous savons qu'il est indispensable pour notre créativité et pour notre bonheur. Par conséquent il semblerait que le déterminisme soit opposé au bonheur.

Mais qu'est-ce que précisément le libre arbitre ? Beaucoup d'encre a coulé pour tenter de trouver une définition précise. Nous pouvons essayer de définir le libre arbitre comme la liberté dans le choix des conditions initiales. Toutefois, des conditions initiales doivent elles-mêmes résulter des équations d'évolution, de telle façon qu'il n'y a en réalité pas de liberté dans leur choix. Nous pouvons tenter de définir le libre arbitre à partir de l'idée de l'imprévisibilité, ou à partir de propriétés similaires, comme l'incalculabilité. Mais ces définitions se heurtent au même problème de base : quelle que soit cette définition, il n'y a *aucune voie* pour démontrer expérimentalement qu'une action a été réalisée librement. Les éventuelles définitions sont inutiles. En résumé, le libre arbitre *ne peut pas* être observé. (Les psychologues possèdent également un grand nombre de données

* Cela peut malgré tout faire l'objet de nombreux divertissements.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

qui leur sont propres pour appuyer cela, mais c'est une autre histoire.)

Aucun processus *graduel* – par opposition à *instantané* – ne peut être dû au libre arbitre. Les processus graduels sont décrits par le temps et sont déterministes. En ce sens, la question concernant le libre arbitre en devient une concernant l'existence de changements instantanés dans la nature. Ce sera un sujet récurrent dans la suite de notre promenade. La nature a-t-elle le potentiel de surprendre ? Dans notre vie courante, elle ne l'a pas. Des modifications subites ne sont pas observées. Bien entendu, nous aurons toujours à examiner cette question dans d'autres domaines, dans l'infiniment petit et dans l'infiniment grand. En réalité, nous changerons d'opinion plusieurs fois. L'absence de surprise dans la vie quotidienne est fondée de manière profonde dans notre corps : la notion de curiosité est basée sur l'idée que toute chose découverte est utile par la suite. Si la nature nous surprenait constamment, la curiosité n'aurait aucun sens.

Une autre remarque contredit l'existence des aberrations : au début de notre excursion, nous définissions le temps en faisant usage de la continuité du mouvement, plus tard nous avions exprimé cela en disant que le temps est une conséquence de la conservation de l'énergie. La conservation est le contraire de la surprise. D'ailleurs, un défi demeure : pouvez-vous montrer que le temps ne serait pas définissable même si les surDéfi 323 s prises n'existaient que *rarement* ?

Succinctement, jusqu'à présent nous n'avons aucune preuve que les surprises existent dans la nature. Le temps existe parce que la nature est déterministe. Le libre arbitre ne peut pas être défini avec la précision requise par la physique. En formulant qu'il n'y a aucun changement instantané, nous formulons implicitement qu'il n'existe qu'une définition consistante du libre arbitre : c'est une *sensation*, en particulier d'indépendance par rapport aux autres, d'indépendance par rapport à la peur et d'acceptation des conséRéf. 137 quences de nos actions. Le libre arbitre est une sensation de satisfaction. Cela résout le paradoxe apparent : le libre arbitre étant une impression, il existe en tant qu'expérience humaine, même si tous les objets se déplacent sans aucune possibilité de choisir. Il n'y a aucune contradiction*.

Réf. 138 Même si l'action humaine est prédéterminée, elle reste authentique. Alors pourquoi le déterminisme est-il si effrayant ? C'est une question que chacun doit se poser à lui-même. Quelle distinction le déterminisme implique-t-il pour votre vie, pour les actions, les Défi 325 e choix, les responsabilités et les plaisirs que vous rencontrez** ? Si vous concluez qu'être conditionné est différent d'être libre, vous devez changer votre manière de vivre ! La peur du déterminisme provient généralement du refus de considérer le monde tel qu'il est. Paradoxalement, c'est précisément celui qui insiste sur l'existence du libre arbitre qui cherche à échapper aux responsabilités.

* Le fait que le libre arbitre soit une sensation peut également être confirmé par une introspection attentive. L'idée du libre arbitre survient toujours *après* qu'une action a été entamée. C'est une expérience magnifique que de s'asseoir dans un environnement paisible, avec l'intention de faire, dans un nombre indéterminé de minutes, un petit geste, comme fermer sa main. Si vous observez attentivement, dans tous ses détails, ce qui Défi 324 e se passe à l'intérieur de vous-même aux alentours du véritable moment de la décision, vous trouvez soit un mécanisme qui a conduit à la décision, soit une vague impression obscure et diffuse. Vous ne trouvez jamais de libre arbitre. Une telle expérience est une voie magnifique pour expérimenter avec profondeur les prodiges de la personnalité. Des expériences de ce genre peuvent également être une des origines possibles de la spiritualité humaine, puisqu'elles indiquent la relation que chacun entretient avec le reste de la nature.

** Si les « lois » de la nature sont déterministes, sont-elles en contradiction avec les « lois » morales ou Défi 326 s éthiques ? Les gens peuvent-ils toujours être tenus pour responsables de leurs actions ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

> « Vous avez la capacité de vous surprendre vous-même. »
>
> Richard Bandler et John Grinder

Une conclusion étrange sur le mouvement

> « Darum kann es in der Logik auch *nie* Überraschungen geben*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.1251

La mécanique classique décrit la nature d'une manière relativement simple. Les *objets* sont invariables et sont des entités massives situées dans l'espace-temps. Les *états* sont les propriétés variables des objets, décrites par la position dans l'espace et l'instant dans le temps, par l'énergie et la quantité de mouvement, et par leurs équivalents rotationnels. Le *temps* est la relation mesurée par une horloge entre des événements. Les *horloges* sont des dispositifs en mouvement non perturbé dont la position peut être observée. L'*espace*, et la position, est la relation mesurée par une règle graduée entre des objets. Les *règles graduées* sont des appareils dont la forme est subdivisée par quelques marques, figées de manière invariante et observable. Le *mouvement* est la variation de la position dans le temps (fois la masse), il est déterminé, ne révèle aucune surprise, il est conservé (même après la mort), et est provoqué par la gravitation et d'autres interactions.

Même si cette description fonctionne plutôt bien, elle contient une définition en
Défi 327 s boucle. Pouvez-vous l'identifier ? Chacun des deux concepts centraux du mouvement est défini à l'aide de l'autre. Les physiciens s'escrimèrent pendant environ 200 ans sur la mécanique classique sans remarquer ou sans vouloir remarquer ce fait. Même les penseurs qui avaient un intérêt à discréditer la science ne l'ont pas relevé. Une science exacte
Défi 328 s peut-elle être fondée sur une définition circulaire ? Manifestement, la physique s'en est plutôt bien sortie jusqu'à présent. Certains ont même affirmé que cette situation est en principe inévitable. Malgré ces jugements, défaire cette boucle logique est une des aspirations du reste de notre promenade. Pour l'accomplir, nous avons besoin d'accroître considérablement le niveau de précision de notre description du mouvement.

À chaque fois que la précision est accrue, l'imagination est restreinte. Nous découvrirons que de nombreux types de mouvement qui paraissent réalisables ne le sont pas. Le mouvement est limité. La Nature limite la vitesse, la taille, l'accélération, la masse, la force, la puissance et un grand nombre d'autres quantités. Ne persévérez dans votre lecture que si vous êtes préparé à troquer la fantaisie pour la précision. Cela ne sera pas perdu, puisque vous obtiendrez alors quelque chose d'autre : les rouages de la nature vous émerveilleront.

Descriptions générales du mouvement

> « Πλεῖν ἀνάγκε, ζῆν οὐκ ἀνάγκη**. »
>
> Pompée

* « Par conséquent il ne peut *jamais* y avoir de surprises dans la logique. »

** « Navigare necesse, vivere non necesse (Naviguer est nécessaire, mais il n'est pas nécessaire de vivre). »
Réf. 139 Gnaeus Pompeius Magnus (106–48 av. J.-C.), cité par Plutarque (v. 45 à v. 125).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 92 Quelle forme de rampe permet à la pierre noire de glisser le plus rapidement du point A au point inférieur B ?

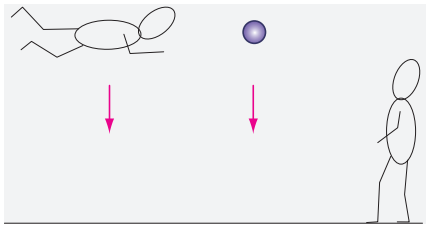


FIGURE 93 Le mouvement peut-il être défini de la même manière pour tous les observateurs ?

Partout sur la Terre – même en Australie – les gens remarquent que les pierres tombent « vers le bas ». La promulgation de la « loi » universelle de la gravitation a été facilitée par cette constatation ancestrale. Pour le découvrir, tout ce qu'il y eut à faire fut de rechercher une description de la gravité qui fût valide au niveau général. La seule remarque complémentaire qui doit être faite afin de déduire la formule $a = GM/r^2$ est que la gravité varie avec la hauteur.

En résumé, le fait de réfléchir *globalement* nous aide à rendre notre description du mouvement plus précise. Comment pouvons-nous décrire le mouvement de la manière la plus générale possible ? Il apparaît que nous avons six manières d'aborder cette question, chacune d'elles nous sera utile sur notre chemin vers le sommet de la Montagne Mouvement. Nous commencerons par une vue d'ensemble, puis nous explorerons les détails de chaque approche.

— La première approche globale du mouvement émane du caractère limité de ce que nous avons appris jusqu'à présent. Lorsque nous déduisons le mouvement d'une particule à partir de son accélération en cours, nous sommes en train d'utiliser la description du mouvement la plus *locale* possible. Par exemple, toutes les fois que nous utilisons une équation d'évolution, nous utilisons en fait l'accélération de la particule en un lieu et à un instant donnés pour déterminer sa position et son mouvement *juste après* cet instant et *au voisinage immédiat* de cet endroit.

Les équations d'évolution ont donc un « horizon » imaginaire de rayon zéro.

L'approche opposée est illustrée dans le célèbre problème de la Figure 92. Le défi est de trouver le trajet qui permet de réaliser le mouvement de glissade le plus rapide possible depuis un point élevé jusqu'à un point distant plus bas. Pour résoudre cela, nous avons besoin de considérer le mouvement comme un tout, pour tous les instants et toutes les positions. L'approche globale requise par des interrogations comme celle-ci nous mènera tout droit à une description du mouvement qui est simple, précise et séduisante : le dénommé principe de paresse universelle, également connu sous le nom de principe de moindre action.

Défi 329 d

— La deuxième approche globale du mouvement émerge lorsque nous comparons les diverses descriptions du même système fournies par des observateurs distincts. Par exemple, les observations d'une personne qui chute d'une falaise, d'un passager de montagnes russes, et d'un observateur debout sur le plancher des vaches seront généralement différentes. Les relations entre toutes ces observations nous conduisent à

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

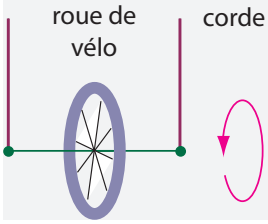


FIGURE 94 Que se passe-t-il lorsqu'une corde est coupée ?

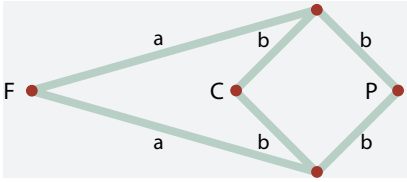


FIGURE 95 Comment dessiner une ligne droite à l'aide d'un compas ? Fixez un point F, posez un crayon à la jointure P et déplacez C avec un compas le long d'un cercle.

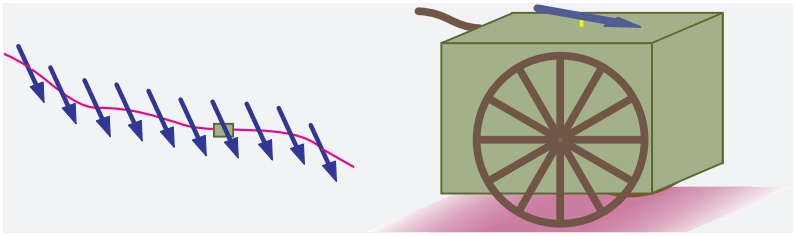


FIGURE 96 Une charrette pointant vers le sud.

une description générale, valide pour tout le monde. Cette méthode nous mène à la théorie de la relativité.

— La troisième approche globale du mouvement consiste à explorer le mouvement des corps *étendus et rigides*, plutôt que celui des masses ponctuelles. Le résultat non intuitif de l'expérience de la Figure 94 montre que le jeu en vaut la chandelle.

Pour pouvoir concevoir des machines, il est indispensable de comprendre comment les corps rigides d'un groupe interagissent. Comme exemple, le mécanisme de la Figure 95 associe le mouvement des points C et P. Il définit tacitement un cercle de telle façon que nous ayons toujours la relation $r_C = 1/r_P$ entre les distances de C et de P à son centre. Pouvez-vous trouver ce cercle ?

Défi 330 pe

Réf. 140 Un autre excellent challenge consiste à inventer une charrette en bois, dotée d'engrenages qui relient une flèche aux roues de telle manière que, quel que soit l'itinéraire que la charrette emprunte, la flèche pointe toujours vers le sud (voir la Figure 96).

Défi 331 d

Comme nous le verrons, la solution à ce problème est utile pour mieux appréhender la relativité générale.

Un autre exemple intéressant pour le mouvement rigide est le fait que les mouvements humains, tel le déplacement d'un bras en général, sont constitués d'un petit nombre de mouvements élémentaires. Tous ces exemples sont tirés du domaine captivant de la technique ; malheureusement, nous aurons trop peu de temps pour explorer ce sujet durant notre excursion.

Réf. 141

— La quatrième manière générale d'aborder le mouvement est l'étude des *corps étendus non rigides*. Par exemple, la *mécanique des fluides* étudie l'écoulement des fluides (tels que le miel, l'eau ou l'air) autour de corps solides (tels des cuillères, des bateaux, des voiles ou des ailes). La mécanique des fluides tente donc d'expliquer comment

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

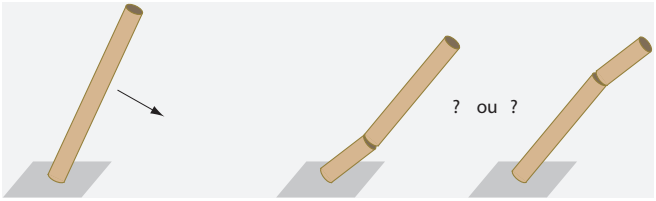


FIGURE 97 Comment et où un conduit de cheminée en brique qui chute se brise-t-il ?

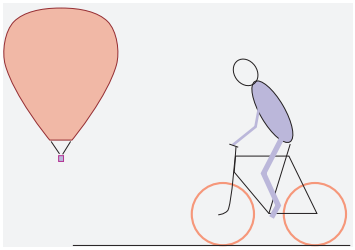


FIGURE 98 Pourquoi les ballons emplis d'air chaud restent-ils gonflés ? Comment pouvez-vous mesurer le poids d'un cycliste en utilisant uniquement une règle ?

FIGURE 99 Qu'est-ce qui détermine le nombre de pétales d'une marguerite ?

volent les insectes, les oiseaux et les avions*, pourquoi les voiliers peuvent naviguer en s'appuyant sur le vent, ce qui se passe quand un œuf dur est mis en rotation sur une fine couche d'eau, ou comment une bouteille pleine de vin peut être vidée de la manière la plus rapide possible.

Réf. 142

Défi 332 s

À l'instar des fluides, nous pouvons étudier le comportement des *solides* déformables. Ce domaine de recherche est appelé la *mécanique des milieux continus*. Elle traite des déformations et des oscillations des structures étendues. Elle cherche à expliquer, par exemple, pourquoi les cloches sont faites selon une forme particulière, comment de grands corps – comme des conduits de cheminée en chute libre – se brisent lorsqu'ils subissent une contrainte, et comment les chats peuvent se retourner tout seuls de façon adéquate pendant qu'ils chutent. Tout au long de notre voyage, nous rencontrerons à plusieurs reprises des problèmes concernant ce domaine, qui empiète même sur la relativité générale et sur le monde des particules élémentaires.

Défi 333 s

— La cinquième approche globale du mouvement concerne l'étude du mouvement d'un nombre colossal de particules. Celle-ci est dénommée la *mécanique statistique*. Les concepts qui nécessitent de décrire les gaz, comme la température et la pression

* Les mécanismes du vol des insectes constituent toujours une discipline de recherches actives. Traditionnellement, la mécanique des fluides était focalisée sur les grands systèmes, comme les bateaux, les navires et les avions. En fait, le plus petit objet conçu par l'homme capable de voler de manière contrôlée – disons, un avion ou un hélicoptère radiocommandé – est beaucoup plus grand et plus lourd que de nombreux êtres volants que l'évolution a engendrés. Il s'avère que commander le vol de petits corps nécessite davantage de connaissances et plus d'astuce que commander le vol d'objets plus grands. Vous pouvez en apprendre plus sur ce sujet à la page **??**.

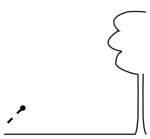
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

(voir la Figure 98), constitueront notre première étape vers la compréhension des trous noirs.

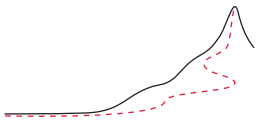
— La sixième approche globale du mouvement concerne tous les points de vue mentionnés ci-dessus *en même temps*. Une telle avancée est primordiale pour comprendre l'expérience quotidienne, et la *vie* elle-même. Pourquoi une fleur possède-t-elle un nombre particulier de pétales ? Comment un embryon se différencie-t-il dans l'utérus ? Qu'est-ce qui fait battre nos cœurs ? Comment les crêtes montagneuses et les silhouettes des nuages émergent-elles ? Comment les astres et les galaxies évoluent-ils ? Comment les vagues de l'océan sont-elles façonnées par le vent ?

  Tous ces cas sont des exemples d'*auto-organisation* ; les chercheurs en sciences de la vie parlent simplement de *croissance*. Quelle que soit la désignation utilisée pour ces processus, ils sont caractérisés par l'apparition spontanée de motifs, de formes et de cycles. Ces processus constituent un sujet commun de recherche à travers un grand nombre de disciplines, incluant la biologie, la chimie, la médecine, la géologie et les sciences de l'ingénieur.

Nous allons maintenant donner une courte introduction à ces six approches globales du mouvement. Nous allons commencer avec la première, à savoir la description générale des objets, assimilés à des points, en mouvement. La méthode élégante décrite ci-dessous fut le résultat de plusieurs siècles d'efforts collectifs, et constitue le point culminant de la mécanique. Elle fournit également les bases pour toutes les descriptions supplémentaires du mouvement que nous rencontrerons plus tard.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 8

MESURER LE CHANGEMENT AVEC L'ACTION

Le mouvement peut être décrit par des nombres. Pour une unique particule, les relations entre les coordonnées spatiales et temporelles décrivent le mouvement. La prise de conscience que des expressions telles que $(x(t), y(t), z(t))$ peuvent être employées pour retracer l'itinéraire d'une particule en mouvement fut une étape décisive dans le progrès de la physique moderne.

Nous pouvons aller encore plus loin. Le mouvement est une forme de changement. Et ce changement peut lui-même être utilement décrit par des nombres. En réalité, le changement peut être quantifié par un nombre unique. Cette découverte constitua l'étape cruciale suivante. Il fallut aux physiciens près de deux siècles d'efforts pour dévoiler la manière de décrire le changement. En conséquence, la quantité qui mesure le changement possède un nom étrange : elle est appelée *action (physique)**. Pour se rappeler le rapport qui existe entre l'« action » et le changement, pensez simplement à un film d'Hollywood : quand il y a beaucoup d'action, il y a aussi une grande quantité de changements.

Imaginez que nous prenions deux clichés d'un système à des instants différents. Comment pourriez-vous définir la quantité de changement qui se produit entre les deux ? À quels moments les choses changent-elles beaucoup, et quand changent-elles seulement un petit peu ? Primo, un système qui possède beaucoup de mouvement témoigne d'une grande quantité de changement. Il paraît donc logique que l'action d'un système constitué de sous-systèmes indépendants doive être la somme des actions de ces sous-systèmes.

Secundo, le changement s'accumule souvent – mais pas toujours – au cours du temps ; dans d'autres cas, un changement récent peut compenser un changement antérieur. Le changement peut ainsi augmenter ou diminuer avec le temps.

* Remarquez que cette « action » n'est pas identique à l'« action » qui apparaît dans des formulations telles que « chaque action possède une réaction égale et opposée ». Ce dernier usage, initié par Newton, n'a pas résisté ; par conséquent ce terme a été réutilisé. Après Newton, le terme « action » fut tout d'abord utilisé pour une signification intermédiaire avant d'être finalement adopté dans son sens moderne employé ici. Cette dernière signification est la seule qui est utilisée dans ce texte.

Un autre emploi qui a été recyclé est le « principe de moindre action ». Dans les livres anciens, il était employé dans un contexte différent de celui de ce chapitre. Actuellement, il se réfère à ce qu'il est d'usage d'appeler le *principe de Hamilton* dans le monde anglo-saxon, bien qu'il soit (principalement) dû à d'autres personnalités, particulièrement Leibniz. Les anciennes significations et dénominations sont tombées en désuétude et ne sont pas maintenues ici.

Derrière ces mutations terminologiques se cache l'histoire longue de deux siècles de tentatives effrénées pour décrire le mouvement à l'aide des *principes variationnels* ou *extrémaux* : l'objectif était de perfectionner et d'achever le travail initié par Leibniz. Ces principes n'ont aujourd'hui qu'un intérêt historique, parce qu'ils sont tous des cas particuliers du principe de moindre action décrit ici.

Réf. 143

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 23 Quelques valeurs d'action pour des changements observés ou imaginaires.

CHANGEMENT	VALEUR APPROXIMATIVE POUR L'ACTION
Le plus petit changement mesurable	$0{,}5 \cdot 10^{-34}$ Js
Exposition d'une pellicule photographique	$1{,}1 \cdot 10^{-34}$ Js à 10^{-9} Js
Battement d'aile d'une drosophile (mouche)	env. 1 pJs
Ouverture d'une fleur au lever du jour	env. 1 nJs
Avoir les joues rouges	env. 10 mJs
Verre tenu par rapport à un verre lâché	0,8 Js
Arbre courbé par le vent d'un côté à l'autre	500 Js
Faire disparaître un lapin blanc par de la « vraie » magie	100 PJs
Dissimuler un lapin blanc	env. 0,1 Js
Changement cérébral maximum en une minute	env. 5 Js
Rester en lévitation à 1 m pendant une minute	env. 40 kJs
Accident de voiture	env. 2 kJs
Naissance	env. 2 kJs
Changement provoqué par une vie humaine	env. 1 EJs
Arrêt d'un véhicule pendant le clignement d'un œil	20 kJs
Grand tremblement de terre	env. 1 PJs
Disparition d'une voiture pendant le clignement d'un œil	1 ZJs
Lever du soleil	env. 0,1 ZJs
Une source de sursaut gamma avant et après l'explosion	env. 10^{46} Js
L'univers après qu'une seconde s'est écoulée	indéfini et indéfinissable

Tertio, pour un système dans lequel le mouvement est stocké, transformé ou transféré d'un sous-système à un autre, le changement est inférieur à celui d'un système pour lequel ce n'est pas le cas.

Les propriétés mentionnées impliquent que la mesure naturelle du changement est l'écart moyen entre l'énergie cinétique et potentielle multiplié par le temps écoulé. Cette quantité possède toutes les bonnes propriétés : elle est (habituellement) la somme des quantités correspondantes pour tous les sous-systèmes si ceux-ci sont indépendants, elle augmente généralement avec le temps (à moins que l'évolution ne compense quelque chose qui est survenu auparavant), et elle diminue si le système transforme du mouvement en énergie potentielle.

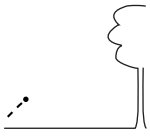
Défi 334 e

Ainsi l'*action* (physique) S, mesurant le changement dans un système, est défini comme

$$S = \overline{L} \cdot (t_f - t_i) = \overline{T - U} \cdot (t_f - t_i) = \int_{t_i}^{t_f} (T - U)\, dt = \int_{t_i}^{t_f} L\, dt\,, \qquad (57)$$

Page 125

où T représente l'énergie cinétique, U l'énergie potentielle que nous connaissons déjà, L est la différence entre eux, et la barre supérieure indique une moyenne temporelle.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 100 Joseph Lagrange.

La quantité L s'appelle le *lagrangien* (ou *fonction lagrangienne*) du système* et décrit ce qui est ajouté au cours du temps, à chaque fois que les choses changent. Le signe $\int$ est un « S » étiré, pour « somme », et est prononcé « intégrale de ». En termes intuitifs il désigne l'opération (appelée *intégration*) d'adjonction des valeurs d'une quantité variant au cours d'intervalles infinitésimaux de temps $\mathrm{d}t$. Les instants initial et final sont notés, respectivement, en bas et en haut du signe « intégrale ». La Figure 101 clarifie cette idée : l'intégrale représente simplement l'aire de la zone sombre située sous la courbe $L(t)$.

Défi 335 e Mathématiquement, l'intégrale de la courbe $L(t)$ est définie comme suit

$$\int_{t_\mathrm{i}}^{t_\mathrm{f}} L(t)\,\mathrm{d}t = \lim_{\Delta t \to 0} \sum_{\mathrm{m=i}}^{\mathrm{f}} L(t_\mathrm{m})\Delta t = \overline{L} \cdot (t_\mathrm{f} - t_\mathrm{i})\ . \tag{58}$$

En d'autres termes, l'intégrale est la limite, lorsque les intervalles de temps deviennent très petits, de la somme des aires des bandes rectangulaires distinctes qui approchent la fonction**. Puisque le signe $\sum$ représente également une somme, et puisqu'un intervalle de temps Δt infinitésimal est noté $\mathrm{d}t$, nous pouvons comprendre la notation utilisée pour l'intégration. L'intégration est une somme de toutes les tranches. Cette notation fut développée par Gottfried Leibniz pour souligner précisément cette remarque. Physiquement parlant, l'intégrale du lagrangien mesure l'*effet* que L accumule au cours du temps. En fait, l'action est appelée « effet » dans certaines langues, comme l'allemand.

En résumé, l'action est l'intégrale du lagrangien sur un intervalle de temps. L'unité de l'action, et donc du changement physique, est l'unité de l'énergie (le joule, J), multiplié par l'unité du temps (la seconde). Ainsi, le changement est mesuré en Js. Une valeur importante signifie un grand changement. Le Tableau 23 montre quelques valeurs approximatives d'actions.

Pour comprendre plus précisément la définition de l'action, nous allons commencer avec le cas le plus simple : un système qui possède une énergie potentielle nulle, telle une

* Celle-ci est baptisée d'après Giuseppe Lodovico Lagrangia (n. Turin 1736, d. Paris 1813), plus connu sous le nom de Joseph-Louis Lagrange. Il fut le plus important mathématicien de son époque, commença sa carrière à Turin, puis travailla pendant 20 ans à Berlin, et finalement pendant 26 ans à Paris. Il travailla entre autres sur la théorie des nombres et la mécanique analytique, pour laquelle il développa la majeure partie de l'arsenal mathématique utilisé de nos jours dans les calculs en mécanique classique et en gravitation classique. Il appliqua cela avec succès à de nombreux mouvements observés dans le Système solaire.

** Pour plus de détails sur l'intégration, voir l'Annexe ??.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

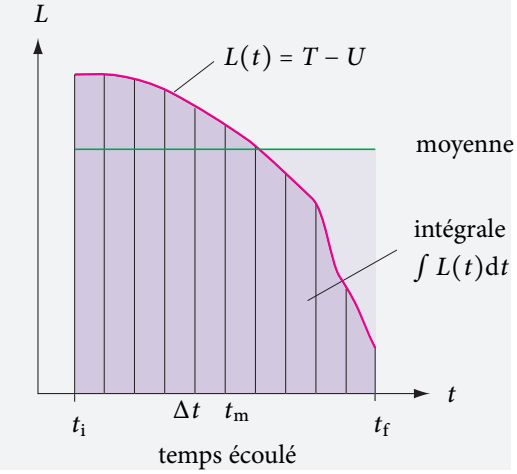


FIGURE 101 Définition de l'effet total comme une accumulation (addition ou intégrale) de petits effets au cours du temps.

particule se déplaçant librement. Bien évidemment, une grande énergie cinétique implique qu'il y a beaucoup de changement. Si nous observons la particule à deux instants donnés, plus la distance spatiale entre ces deux points est grande et plus le changement est important. En outre, le changement observé est plus grand si la particule se déplace plus rapidement, c'est-à-dire si son énergie cinétique est plus importante. Tout cela paraît trivial.

Ensuite, observons une unique particule se déplaçant dans un potentiel. Par exemple, une pierre qui chute perd de l'énergie potentielle en échange d'un gain en énergie cinétique. Plus il y a d'énergie échangée, plus il y a de changement. Cela explique le signe moins (la différence) dans la définition de L. Si nous examinons une particule qui est d'abord jetée en l'air puis qui retombe, la courbe de $L(t)$ est d'abord située en dessous de l'axe du temps, et ensuite au-dessus. Nous remarquons que la définition de l'intégration nous amène à comptabiliser l'aire de la surface grise située *sous* l'axe du temps comme étant *négative*. Le changement peut ainsi être négatif, et peut être, comme prévu, compensé par un changement ultérieur.

Pour quantifier le changement dans un système constitué de plusieurs parties indépendantes, nous ajoutons simplement toutes les énergies cinétiques et nous défalquons toutes les énergies potentielles. Cette méthode nous permet de définir des actions pour des gaz, des liquides et de la matière solide. Même si les constituants interagissent, nous obtenons toujours un résultat sensé. En bref, l'action est une quantité *additive*.

L'action physique mesure donc, à l'aide d'un nombre unique, la quantité du changement observé dans un système entre deux instants donnés du temps. L'objet de l'observation peut être n'importe quoi : une explosion, une caresse affective ou un changement de couleur. Nous découvrirons plus tard que cette idée est également applicable en relativité et dans la théorie quantique. N'importe quel changement se produisant dans n'importe quel système de la nature peut être mesuré à l'aide d'un seul nombre.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 102 La tangente au point minimal d'une courbe possède une pente nulle.

Le principe de moindre action

Nous détenons dorénavant une mesure précise du changement, qui, comme nous allons le voir, permet une description simple et puissante du mouvement. Dans la nature, le changement qui se produit entre deux instants est toujours *le plus petit* possible. *La nature minimise l'action**. De tous les mouvements possibles, la nature choisit constamment celui pour lequel le changement est *minimal*. Examinons-en quelques exemples.

Dans le cas élémentaire d'une particule libre, lorsque aucun potentiel n'est impliqué, le principe de l'action minimale entraîne que la particule se déplace selon une ligne *droite* avec une vitesse *constante*. Tous les autres chemins conduiraient à des actions plus importantes. Pouvez-vous le vérifier ?

Défi 336 e

Lorsque la gravité entre en jeu, une pierre lancée vole le long d'une parabole (ou, plus précisément, le long d'une ellipse) parce que n'importe quelle autre trajectoire, disons une pour laquelle la pierre effectue une boucle en l'air, devrait nécessiter une action *plus importante*. Une nouvelle fois, vous devez certainement avoir envie de le vérifier par acquit de conscience.

Défi 337 e

Toutes les observations soutiennent cette constatation simple et élémentaire : les choses se déplacent toujours de la manière qui engendre la quantité d'action la plus petite possible. Cette affirmation s'applique au chemin tout entier et à chacun de ses segments. Bertrand Russel l'avait appelée la « loi de la paresse universelle ».

Il est d'usage d'exprimer cette notion du changement minimal d'une manière différente. L'action fluctue lorsque la trajectoire varie. La trajectoire réelle est celle dont l'action est la plus petite. Vous vous souviendrez que vous avez appris à l'école que la dérivée d'une fonction s'annule à son minimum : un minimum possède une tangente horizontale. Dans le cas présent, nous ne faisons pas varier une quantité, mais une trajectoire entière, par conséquent nous ne parlons pas d'une dérivée ou d'une pente, mais d'une variation. On a coutume de noter δS la variation de l'action. Le *principe de moindre action* établit donc que :

▷ *La trajectoire réelle entre des points extrémaux donnés vérifie la relation* $\delta S = 0$. (59)

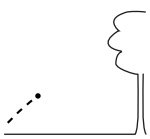
Les mathématiciens appellent cela un *principe variationnel*. Remarquez que les points extrémaux doivent être fixés : nous devons comparer des mouvements ayant les *mêmes* états initiaux et finaux.

* En fait, dans certaines situations particulières l'action est maximale, de telle sorte que la forme la plus générale du principe est que l'action est « stationnaire », ou « extrémale », signifiant par là minimale *ou* maximale. La condition d'annulation de la variation, donnée ci-dessous, recouvre les deux cas à la fois.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Avant de discuter de ce principe plus en détail, nous pouvons vérifier qu'il est équi-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



valent à l'équation d'évolution*. Pour ce faire, nous pouvons mettre en œuvre une procé-

* Pour ceux qui sont intéressés, nous donnons ici quelques commentaires sur l'équivalence entre les équations lagrangiennes et d'évolution. Pour commencer, les lagrangiens ne sont pas définis pour des systèmes non conservatifs, ou *dissipatifs*. Nous avons vu qu'il n'existe pas de potentiel pour chaque mouvement comportant du *frottement* (et plus d'une seule dimension), par conséquent il n'y a pas d'action dans ces circonstances. Une approche possible pour surmonter cette restriction consiste à utiliser une formulation généralisée du principe de moindre action. À chaque fois qu'il y a absence de potentiel, nous pouvons exprimer la variation du *travail* δW entre des trajectoires x_i distinctes comme

$$\delta W = \sum_i m_i \ddot{x}_i \delta x_i \ . \tag{60}$$

Le mouvement est alors décrit de la manière suivante :

$$\triangleright \textit{ La trajectoire réelle satisfait la relation } \int_{t_i}^{t_f} (\delta T + \delta W) \mathrm{d}t = 0 \quad \textit{sachant que} \quad \delta x(t_i) = \delta x(t_f) = 0 \ . \tag{61}$$

La quantité qui est intégrée n'a pas de nom, elle représente une notion généralisée du changement. Vous pourriez essayer de vérifier que cela mène bien aux équations d'évolution appropriées. Ainsi, bien que des descriptions lagrangiennes *adéquates* existent uniquement pour des systèmes *conservatifs*, ce principe peut être extrapolé aux systèmes dissipatifs et rester ainsi efficace.

De nombreux physiciens préféreront une autre approche. Ce qu'un mathématicien nomme une généralisation, un physicien l'appelle un cas particulier : le principe (61) masque le fait que *tout* frottement résulte du principe habituel de l'action minimale, si nous incorporons tous les détails microscopiques. Il n'existe aucun frottement dans le monde microscopique. Le frottement est une notion macroscopique approximative.

Néanmoins, des points de vue mathématiques supplémentaires sont opportuns. Par exemple, ils nous imposent des contraintes intéressantes dans l'utilisation des lagrangiens. Ces limites, qui ne s'appliquent que si l'on conçoit le monde de manière purement classique – ce qui n'est pas vrai –, furent découvertes il y a environ une centaine d'années. À cette époque les ordinateurs n'étaient pas encore disponibles, et l'exploration de nouvelles techniques calculatoires était importante. Nous en donnons un aperçu succinct.

Les coordonnées utilisées en relation avec les lagrangiens ne sont pas nécessairement des coordonnées cartésiennes. Des coordonnées *généralisées* sont particulièrement utiles lorsque le mouvement subit des *contraintes*. C'est le cas pour un pendule, dans lequel la masse doit toujours se trouver à la même distance du point de suspension, ou pour un patineur sur glace, chez qui les patins doivent se déplacer dans la direction vers laquelle ils pointent. Des coordonnées généralisées peuvent même être un amalgame de positions et de quantités de mouvement. Elles peuvent se diviser en plusieurs types génériques.

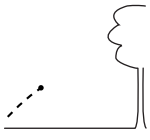
Des coordonnées généralisées sont dénommées *holonomiques–scléronomiques* si elles sont liées aux coordonnées cartésiennes de manière fixée, indépendamment du temps : des systèmes physiques décrits par de telles coordonnées incluent le pendule et une particule dans un potentiel. Des coordonnées sont appelées *holonomiques–rhéonomiques* si la dépendance est aussi temporelle. Un exemple d'un système rhéonomique pourrait être un pendule dont la longueur varie dans le temps. Les deux termes rhéonomique et scléronomique sont dus à Ludwig Boltzmann. Ces deux cas, qui concernent des systèmes qui ne sont décrits que par leur géométrie, sont regroupés ensemble dans les *systèmes holonomiques*. L'expression est de Heinrich Hertz.

La situation la plus générale est dénommée *anholonomique*, ou *non holonomique*. Les lagrangiens fonctionnent bien uniquement pour des systèmes holonomiques. Malheureusement, la signification du terme « non holonomique » a été modifiée. Maintenant, ce terme est aussi utilisé pour désigner certains systèmes rhéonomiques. L'usage moderne qualifie de non holonomique tout système qui prend en compte des vitesses. Donc, un patineur sur glace ou un disque en rotation est fréquemment qualifié de système non holonomique. Il faut donc rester très prudent avant de décider de ce que l'on entend par non holonomique dans chaque contexte particulier.

Même si l'usage des lagrangiens, et de l'action, possède des limitations, ceux-ci ne nous ennuient plus au niveau microscopique, puisque les systèmes microscopiques sont toujours conservatifs, holonomiques et scléronomiques. Au niveau fondamental, les équations d'évolution et les lagrangiens sont en réalité équivalents.

Page 160
Défi 338 pe
Réf. 144
Page 260
Page ??

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



dure courante, qui est une partie intégrante de ce que l'on appelle le *calcul des variations*. La condition $\delta S = 0$ implique que l'action, c'est-à-dire l'aire sous la courbe de la Figure 101, est minimale. Avec un peu de réflexion, on voit que si le lagrangien est de la
Défi 339 pe forme $L(x_n, v_n) = T(v_n) - U(x_n)$, alors

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial v_n}\right) = -\frac{\partial U}{\partial x_n} \tag{62}$$

où n dénombre toutes les coordonnées de toutes les particules*. Pour une unique par-
Défi 340 e ticule, ces *équations de Lagrange du mouvement* se réduisent à

$$m\mathbf{a} = -\nabla U \ . \tag{64}$$

C'est l'équation d'évolution : elle indique que la force qui agit sur une particule est le gradient de l'énergie potentielle U. Le principe de moindre action engendre donc l'équation
Défi 341 s du mouvement. (Pouvez-vous montrer l'inverse ?)

En d'autres termes, *tous les systèmes évoluent d'une manière telle que le changement est aussi petit que possible*. La nature est parcimonieuse. Elle est donc à l'exact opposé d'un thriller hollywoodien, dans lequel l'action est maximale. La nature s'apparente plus à une vieille dame circonspecte qui fait le minimum d'actions.

Le principe de l'action minimale établit également que la trajectoire réelle est celle pour laquelle la *moyenne* du lagrangien sur le chemin tout entier est minimale (voir la Figure 101). La nature est un Dr DoLittle**. Pouvez-vous le vérifier ? Ce point de vue
Défi 342 pe nous permet de déduire directement les équations de Lagrange (62).

Le principe de moindre action différencie la trajectoire réelle de toutes les autres trajectoires imaginaires. Cette observation a conduit Leibniz*** à sa célèbre interprétation que le monde réel est le « meilleur des mondes possibles » ****. Nous pourrions écarter cela comme des spéculations métaphysiques, mais nous devrions rester capables de fasci-

* La forme la plus générale pour un lagrangien $L(q_n, \dot{q}_n, t)$, utilisant les coordonnées holonomiques généralisées q_n, conduit aux équations de Lagrange de la forme

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n}\right) = \frac{\partial L}{\partial q_n} \ . \tag{63}$$

Afin de déduire ces équations, nous avons aussi besoin de la relation $\delta\dot{q} = \mathrm{d}/\mathrm{d}t(\delta q)$. Cette relation est valable uniquement pour les coordonnées *holonomiques* introduites dans la note de bas de page précédente et illustre leur importance.

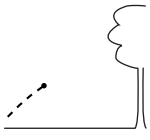
Nous devons aussi souligner que le lagrangien d'un système en mouvement n'est pas unique, cependant, l'étude de la manière selon laquelle les divers lagrangiens d'un système donné en mouvement sont reliés ne
Réf. 145 constitue pas une partie de notre promenade.

D'ailleurs, les indices q pour la position et p pour la quantité de mouvement furent introduits en physique par le mathématicien Carl Jacobi (n. Potsdam 1804, d. Berlin 1851).

** C'est-à-dire qu'elle en fait le moins possible, tel que Phileas Fogg dans *Le Tour du monde en 80 jours*, de Jules Verne : « Phileas Fogg était de ces gens mathématiquement exacts, qui, jamais pressés et toujours prêts, sont économes de leurs pas et de leurs mouvements » [N.D.T.].

*** « Tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles. » Leibniz [N.D.T.].

**** Cette idée fut ridiculisée par le philosophe français Voltaire (1694–1778) dans ses écrits clairvoyants, notamment dans le livre perspicace *Candide*, rédigé en 1759, et toujours largement disponible.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

nation pour ce problème. Leibniz était vraiment excité à propos du principe de moindre action parce que c'était la première fois que des observations réelles étaient distinctes de toutes les autres possibilités imaginables. Pour la première fois, la quête des raisons pour lesquelles les choses sont telles qu'elles sont devenait une partie intégrante de l'investigation physique. Le monde pourrait-il être différent de ce qu'il est ? Dans le principe de moindre action, nous avons un indice de réponse négative. (Qu'en pensez-vous ?) La réponse finale ne fera surface que dans la dernière partie de notre aventure.

Défi 343 s

Étant une manière de décrire le mouvement, le lagrangien présente plusieurs avantages par rapport à l'équation d'évolution. En premier lieu, le lagrangien est généralement plus *concis* que l'écriture des équations d'évolution correspondantes. Par exemple, nous n'avons besoin que d'*un seul* lagrangien pour décrire un système unique, bien qu'ayant de nombreuses particules. Nous faisons moins d'erreurs, en particulier des erreurs de signe, de même que nous apprenons plus rapidement à réaliser les calculs. Essayez simplement de développer les équations d'évolution d'une chaîne de masses reliées par des ressorts, comparez alors ce labeur à celui d'une dérivation en utilisant un lagrangien. (Ce système se comporte comme une chaîne d'atomes.) Nous rencontrerons bientôt un autre exemple : David Hilbert n'eut besoin que de quelques semaines pour déduire les équations du mouvement de la relativité générale en utilisant un lagrangien, alors qu'Albert Einstein avait planché pendant dix ans à les rechercher directement.

Défi 344 pe

De plus, la description à l'aide d'un lagrangien est valable avec *n'importe quel* ensemble de coordonnées décrivant l'objet étudié. Les coordonnées ne doivent pas nécessairement être cartésiennes, elles peuvent être choisies comme nous le voulons : cylindriques, sphériques, hyperboliques, etc. Ces *coordonnées généralisées*, telles qu'on les appelle, nous permettent de calculer rapidement le comportement de nombreux systèmes mécaniques qui sont en pratique trop complexes à étudier par le truchement des coordonnées cartésiennes. Par exemple, pour programmer le mouvement des bras d'un robot, les angles au niveau des articulations fournissent une description plus claire que les coordonnées cartésiennes des extrémités des bras. Les angles sont des coordonnées non cartésiennes. Elles simplifient considérablement les calculs : l'opération de recherche du chemin le plus économique pour mouvoir la main d'un robot d'un point à un autre peut être résolue beaucoup plus facilement à l'aide de variables angulaires.

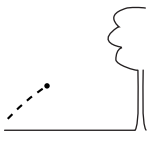
De manière plus importante, le lagrangien nous permet de déduire rapidement les propriétés essentielles d'un système, à savoir ses *symétries* et ses *quantités conservées*. Nous développerons cette idée fondamentale prochainement, et nous l'utiliserons régulièrement tout au long de notre promenade.

Page 196

Finalement, la formulation lagrangienne peut être généralisée pour embrasser *tous les types d'interactions*. Puisque les concepts d'énergie cinétique et potentielle sont généraux, le principe de moindre action peut être utilisé en électricité, en magnétisme et en optique aussi bien qu'en mécanique. Le principe de moindre action est primordial en relativité générale et en théorie quantique, et nous permet d'associer aisément ces deux domaines à la mécanique classique.

Au fur et à mesure que le principe de moindre action s'est répandu, les gens l'ont appliqué à un nombre toujours croissant de problèmes. Aujourd'hui, des lagrangiens sont utilisés partout depuis l'étude des collisions de particules élémentaires jusqu'à la programmation du mouvement des robots en intelligence artificielle. Toutefois, nous ne devons pas oublier que, malgré sa simplicité remarquable et son intérêt, la formulation

Réf. 143



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lagrangienne est *équivalente* aux équations d'évolution. Elle n'est ni plus générale ni plus
Défi 345 s spécifique. En particulier, elle *ne* donne *pas une explication* pour n'importe quel type de mouvement, mais simplement une image de celui-ci. En réalité, la recherche d'une nouvelle « loi » physique du mouvement se résume *simplement* à la recherche d'un nouveau lagrangien. C'est logique puisque la description de la nature requiert toujours la description du changement. Le changement dans la nature est invariablement représenté par des actions et des lagrangiens.

Le principe de moindre action formule que l'action est minimale lorsque les points extrémaux du mouvement, et en particulier le temps écoulé entre eux, sont figés. Il est
Réf. 146 moins bien connu que le principe réciproque est également valable : si l'action reste fixe,
Défi 346 pe le temps écoulé est maximum. Pouvez-vous le montrer ?

Bien que le principe de moindre action ne soit pas une explication du mouvement, d'une manière ou d'une autre il en appelle une. Cependant, nous devons nous armer de patience. *Pourquoi* la nature obéit au principe de moindre action et *comment* elle le fait deviendront limpides lorsque nous examinerons la théorie quantique.

> « Ne confondez jamais le mouvement avec l'action. »
>
> Ernest Hemingway

Réf. 147

POURQUOI LE MOUVEMENT EST-IL SI SOUVENT LIMITÉ ?

> « L'optimiste pense qu'il est dans le meilleur des mondes possibles, et le pessimiste est conscient de cela. »
>
> Robert Oppenheimer

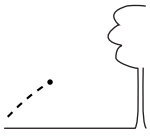
En regardant autour de nous sur Terre et dans le ciel, nous observons que la matière n'est pas uniformément distribuée. La matière est attirée par d'autre matière : elle s'amasse en *agrégats*. Quelques exemples majeurs d'agrégats sont donnés dans la Fi-
Réf. 148 gure 103 et dans le Tableau 24. Dans le diagramme masse–taille de la Figure 103, les deux échelles sont logarithmiques. Nous notons la présence de trois lignes droites : une ligne $m \sim l$ qui se prolonge vers le haut depuis la masse de Planck* jusqu'à l'univers lui-même via les trous noirs, une ligne $m \sim 1/l$ qui se prolonge vers le bas depuis la masse de Planck jusqu'à l'agrégat le plus fin possible, et la ligne classique de la matière $m \sim l^3$, qui se prolonge vers le haut depuis les atomes, en passant par la Terre et le Soleil. La première de ces lignes, la limite du trou noir, est interprétée par la relativité générale, les deux dernières, la limite des agrégats et la ligne classique de la matière, le sont par la théorie quantique**.

Les agrégats qui ne sont pas situés sur la ligne classique de la matière montrent également que plus l'interaction qui maintient les constituants ensemble est forte, plus les agrégats sont petits. Mais pourquoi la matière est-elle principalement rencontrée dans des amas ?

Avant tout, des agrégats de matière se forment à cause de l'existence d'interactions *attractives* entre les objets. Deuxièmement, ils se forment à cause des *frottements* : lorsque

Page 303 * La masse de Planck est donnée par $m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G} = 21{,}767(16)\,\mu\text{g}$.

** La Figure 103 suggère que des domaines situés au-delà de la physique puissent exister, nous découvrirons plus tard que ce n'est pas le cas puisque la masse et la taille ne sont pas définies dans ces domaines.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

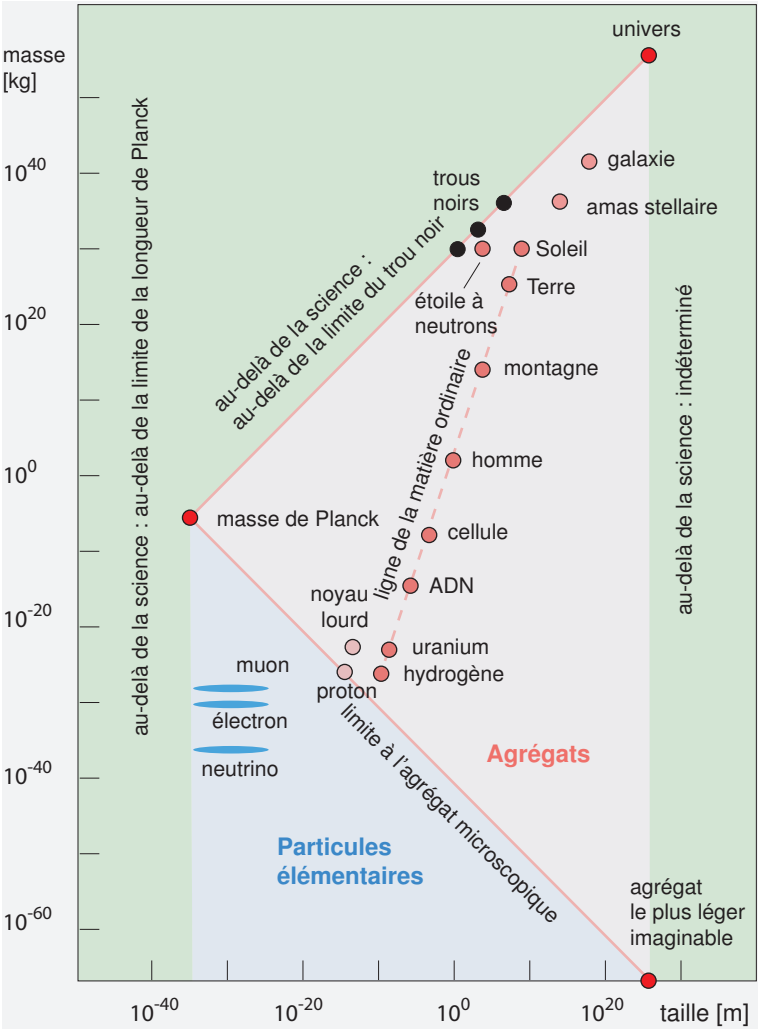


FIGURE 103 Les agrégats dans la nature.

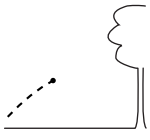
deux constituants se rapprochent, un agrégat peut être créé uniquement si l'énergie libérée peut se transformer en chaleur. Troisièmement, les agrégats possèdent une taille finie à cause des effets *répulsifs* qui empêchent les objets de s'écrouler complètement. De concert, ces trois facteurs assurent que le mouvement fini est beaucoup plus courant que le mouvement « libre », sans limite.

Trois types seulement d'attraction conduisent aux agrégats : la gravité, l'attraction entre charges électriques et l'interaction nucléaire forte. De façon similaire, trois types seulement de répulsion sont observés : la rotation, la pression et le principe d'exclusion de Pauli (que nous rencontrerons plus tard). Des neuf combinaisons possibles d'attraction et de répulsion, toutes n'apparaissent pas dans la nature. Pouvez-vous relever lesquelles sont absentes à partir de la Figure 103 et du Tableau 24, et pourquoi ?

Page ??

Défi 347 s

De façon coordonnée, l'attraction, le frottement et la répulsion impliquent que le changement et l'action sont minimisés quand des objets se rencontrent puis restent



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

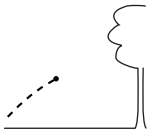
ensemble. Le principe de moindre action engendre donc la stabilité des agrégats. Par ailleurs, l'histoire de la formation du monde explique également pourquoi tant d'agrégats *tournent*. Pouvez-vous dire pourquoi ?

Défi 348 pe

Mais finalement, pourquoi le frottement existe-t-il ? Pourquoi des interactions attractives et répulsives existent-elles ? Et pourquoi – comme cela devrait se manifester d'après ce qui a été dit – la matière ne s'est-elle *pas* trouvée sous forme d'agrégats à certaines époques reculées ? Dans le but de répondre à ces questions, nous devons tout d'abord analyser une autre propriété générale du mouvement : la symétrie.

TABLEAU 24 Quelques agrégats principaux rencontrés dans la nature.

AGRÉGAT	TAILLE (DIAMÈTRE)	NB OBS.	COMPOSANTS
agrégats gravitationnellement liés			
matière à travers l'univers	≈ 100 Ym	1	superamas de galaxies, atomes d'hydrogène et d'hélium
quasar	10^{12} à 10^{14} m	$20 \cdot 10^6$	baryons et leptons
superamas de galaxies	≈ 3 Ym	10^7	amas et groupes de galaxies
amas de galaxies	≈ 60 Zm	$25 \cdot 10^9$	10 à 50 galaxies
groupe de galaxies ou amas	≈ 240 Zm		de 50 à plus de 2 000 galaxies
notre groupe local de galaxies	50 Zm	1	≈ 40 galaxies
galaxie ordinaire	0,5 à 2 Zm	$3,5 \cdot 10^{12}$	10^{10} à $3 \cdot 10^{11}$ étoiles, nuages de poussière et de gaz, peut-être des systèmes solaires
notre galaxie	1,0(0,1) Zm	1	10^{11} étoiles, nuages de poussière et de gaz, systèmes solaires
nuages interstellaires	jusqu'à 15 Em	$\gg 10^5$	hydrogène, glace et poussière
système solaire [a]	inconnu	> 100	étoile, planètes
notre Système solaire	30 Pm	1	Soleil, planètes (diamètre de l'orbite de Pluton : 11,8 Tm), satellites, planétoïdes, comètes, astéroïdes, poussière, gaz
nuage d'Oort	6 à 30 Pm	1	comètes, poussière
ceinture de Kuiper	60 Tm	1	planétoïdes, comètes, poussière
étoile [b]	10 km à 100 Gm	$10^{22\pm1}$	gaz ionisé : protons, neutrons, électrons, neutrinos, photons
notre étoile	1,39 Gm		
planète [a] (Jupiter, Terre)	143 Mm, 12,8 Mm	9+ ≈ 100	solides, liquides, gaz et, en particulier, atomes lourds
planétoïdes (Varuna, etc.)	50 à 1 000 km	≈ 10 (est. 10^9)	solides
satellites	10 à 1 000 km	≈ 50	solides
étoiles à neutrons	10 km	≈ 1 000	principalement des neutrons
agrégats électromagnétiquement liés [c]			



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

AGRÉGAT	TAILLE (DIAMÈTRE)	NB OBS.	COMPOSANTS
astéroïdes, montagnes [d]	1 m à 930 km	>26 000	(10^9 estimés) solides, généralement monolithiques
comètes	10 cm à 50 km	$> 10^6$	glace et poussière
planétoïdes, solides, liquides, gaz, fromage	1 nm à > 100 km	n.a.	molécules, atomes
animaux, plantes, képhir	5 µm à 1 km	$10^{26\pm2}$	organes, cellules
cerveau	0,15 m	10^{10}	neurones et autres types de cellules
cellules :		$10^{31\pm1}$	organites, membranes, molécules
la plus petite (*Nanoarchaeum equitans*)	≈ 400 nm		molécules
amibe	600 µm		molécules
la plus grande (nerf de baleine, plantes unicellulaires)	≈ 30 m		molécules
molécules :		$\approx 10^{78\pm2}$	atomes
H_2	≈ 50 pm	$10^{72\pm2}$	atomes
ADN (humain)	2 m (total par cellule)	10^{21}	atomes
atomes, ions	30 pm à 300 pm	$10^{80\pm2}$	électrons et noyaux
agrégats liés par l'interaction faible [c]			
aucun			
agrégats liés par l'interaction forte [c]			
noyau	$> 10^{-15}$ m	$10^{79\pm2}$	nucléons
nucléon (proton, neutron)	$\approx 10^{-15}$ m	$10^{80\pm2}$	quarks
mésons	$\approx 10^{-15}$ m	n.a.	quarks
étoiles à neutrons : voir ci-dessus			

a. Ce n'est qu'en 1994 que fut mise en évidence la première pièce à conviction sur le fait qu'il existe des objets qui tournent autour d'étoiles autres que notre Soleil. Sur plus de 100 *planètes extrasolaires* détectées jusqu'à présent, la plupart se trouvent autour d'étoiles de classe F, G et K (les lettres désignent le *type spectral* de l'astre. C'est la classification de Harvard qui attribue un type spectral à une étoile, elle correspond globalement à une échelle de température [N.D.T.]), y compris des étoiles à neutron. Par exemple, trois corps encerclent le pulsar PSR 1257+12, et un anneau de matière entoure l'étoile β Pictoris. Ces corps apparaissent comme étant des astres sombres, des naines brunes ou d'énormes planètes gazeuses comme Jupiter. En raison des restrictions dues aux dispositifs d'observation, aucun des systèmes découverts jusqu'à présent ne constitue un système solaire du même type que celui dans lequel nous vivons. En réalité, seul un petit nombre de planètes similaires à la Terre ont été détectées jusqu'à maintenant.
Réf. 149
b. Le Soleil se situe parmi les 7 % d'étoiles les plus brillantes. De toutes les étoiles, 80 % sont des naines rouges de classe M, 8 % sont des naines orange de classe K, et 5 % sont des naines blanches de classe D : elles sont toutes très pâles. Presque toutes les étoiles visibles dans le ciel nocturne appartiennent aux 7 % brillantes. Quelques-unes d'entre elles proviennent de la rare classe O de couleur bleue ou de la classe B bleue–blanche (comme l'Épi, Régulus et Rigel), 0,7 % constituent la classe A blanche et lumineuse (comme Sirius, Véga et Altaïr), 2 % sont de la classe F jaune–blanche (comme Canopus, Procyon et l'Étoile polaire), 3,5 % sont

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de la classe G jaune (comme Alpha du Centaure, Capella ou le Soleil). Les exceptions incluent les quelques géantes visibles de la classe K, comme Arcturus et Aldébaran, et les rares supergéantes de classe M, comme Bételgeuse et Antarès. Nous en dirons plus sur les étoiles un peu plus loin.

Page 228

c. Pour plus de détails sur les agrégats *microscopiques*, voir la table des constituants dans l'Annexe **??**.

d. On estime qu'il y a environ 10^9 astéroïdes (ou planétoïdes) d'au moins 1 km de large et environ 10^{20} qui pèsent au moins 100 kg. Par ailleurs, aucun astéroïde situé entre Mercure et le Soleil – les hypothétiques *Vulcanoïdes* – n'a été détecté jusqu'à présent.

Réf. 150

Curiosités et défis amusants sur les lagrangiens

Lorsque Lagrange publia son livre *Mécanique analytique*, en 1788, celui-ci constitua un point culminant de l'histoire de la mécanique. Il était fier d'avoir rédigé un exposé systématique de la mécanique sans un seul dessin. Évidemment l'ouvrage était difficile à lire et ne connut pas un réel succès. Cependant, sa méthode se généralisa le temps d'une génération.

* *

En partant du principe que l'action est la quantité élémentaire qui décrit le mouvement, nous pouvons définir l'énergie comme étant l'action par unité de temps, et la quantité de mouvement comme l'action par unité de distance. L'*énergie* d'un système décrit donc sa quantité de changement au cours d'un certain laps de temps, et la *quantité de mouvement* sa quantité de changement sur une certaine distance. Que représentent alors la quantité de mouvement angulaire et l'énergie rotationnelle ?

Défi 349 s

* *

« Dans la nature, la télépathie ou la prière n'ont aucun effet possible, puisque dans la plupart des cas le changement à l'intérieur du cerveau est nettement inférieur au changement revendiqué dans le monde extérieur. » Cet argument est-il correct ?

Défi 350 s

* *

En physique galiléenne, le lagrangien est la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Plus tard, cette définition sera généralisée d'une façon telle qu'elle aiguisera notre compréhension de cette dichotomie : le lagrangien devient la différence entre une expression représentant des particules libres et une expression due à leurs interactions. En d'autres termes, le mouvement d'une particule est un compromis ininterrompu entre ce que la particule ferait si elle était libre et ce que les autres particules veulent lui faire faire. À cet égard, les particules se comportent beaucoup comme des êtres humains.

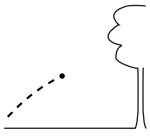
* *

Expliquez ceci : pourquoi $T + U$ est-il constant, alors que $T - U$ est minimal ?

Défi 351 pe

* *

Dans la nature, la somme $T+U$ des énergies cinétique et potentielle est *constante* pendant le mouvement (pour des systèmes isolés), tandis que la moyenne de la différence $T-U$ est *minimale*. Est-il envisageable d'en déduire, en combinant ces deux faits, que les systèmes



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

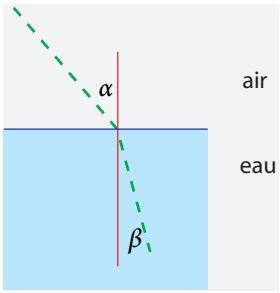


FIGURE 104 La réfraction de la lumière est due à l'optimisation du trajet temporel.

Défi 352 pe tendent vers un état d'énergie potentielle minimale ?

* *

Il existe un principe de *moindre effort* décrivant la croissance des arbres. Lorsqu'un arbre – une *phanérophyte monopodiale** – croît et produit des feuilles, entre 40 % et 60 % de la masse dont il est constitué, à savoir de l'eau et des minéraux, doit être déplacée du sol vers le haut**. Par conséquent, un arbre obtient le plus grand nombre possible de branches le plus haut placées en consommant la plus petite quantité d'énergie. C'est la raison pour laquelle toutes les feuilles ne se situent pas au plus haut sommet d'un arbre. Pouvez-vous
Défi 353 pe déduire d'autres conclusions sur les arbres à partir de ce principe ?

* *

Un autre principe de minimisation peut être utilisé pour comprendre la conception du corps des animaux, particulièrement leur taille et les proportions de leurs structures
Réf. 151 internes. Par exemple, la pulsation du cœur et la fréquence de respiration varient ensemble avec la masse animale m comme $m^{-1/4}$, et la puissance dissipée varie comme $m^{3/4}$. Il s'avère que de tels exposants découlent de trois propriétés des êtres vivants. Premièrement, ils transportent de l'énergie et de la matière à travers leur organisme par le truchement d'un réseau ramifié de vaisseaux : quelques-uns sont grands et beaucoup d'autres sont petits. Deuxièmement, ces vaisseaux possèdent tous la même taille minimale. Et troisièmement, ces réseaux sont optimisés afin de minimiser l'énergie requise pour le transport. Ensemble, ces relations expliquent de nombreuses autres lois d'échelle, elles devraient également expliquer pourquoi l'échelle de l'espérance de vie animale est comme $m^{-1/4}$, ou pourquoi la plupart des mammifères ont approximativement le même nombre de battements de cœur de leur vivant.

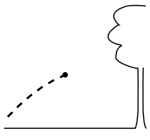
Une explication concurrente, utilisant un principe de minimisation différent, stipule qu'un quart de la puissance produite dans n'importe quel réseau est utilisé afin que le
Réf. 152 flux rejoigne la destination par le chemin le plus direct.

* *

Le principe de minimisation pour le mouvement de la lumière est encore plus élégant : la

* Phanérophyte : végétal pérenne dont les bourgeons sont situés à plus de 50 cm du sol pendant le repos végétatif (arbres, arbustes). Monopodial : dont la croissance se fait principalement à partir des bourgeons terminaux (la plante est peu ramifiée). [N.D.T.]

** Le reste de la masse provient du CO_2 de l'air.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lumière emprunte toujours le chemin qui nécessite le plus petit temps de trajet. On savait depuis longtemps que cette idée décrivait exactement comment la lumière change de direction lorsqu'elle passe de l'air à l'eau. Dans l'eau, la lumière se déplace plus lentement, le rapport entre la vitesse dans l'air et celle dans l'eau est appelé l'*indice de réfraction* de l'eau. L'indice de réfraction, généralement noté n, dépend de la matière traversée. Sa valeur pour l'eau est d'environ 1,3. Ce rapport des vitesses, associé au principe du temps minimal, conduit à la « loi » de la réfraction, qui s'énonce comme une simple relation entre les sinus des deux angles. Pouvez-vous la déduire ? (En fait, la définition exacte de l'indice de réfraction est en rapport avec le vide, et non avec l'air. Mais cette différence est négligeable : pouvez-vous imaginer pourquoi ?)

Défi 354 s

Défi 355 s

Pour le diamant, l'indice de réfraction est de 2,4. Cette valeur élevée représente une explication possible de l'éclat des diamants lorsqu'ils sont taillés avec 57 faces *étincelantes*. Pouvez-vous imaginer quelques autres raisons ?

Défi 356 s

* *

Pouvez-vous confirmer que chacun de ces principes de minimisation est un cas particulier du principe de moindre action ? En réalité, c'est le cas pour *tous* les principes de minimisation connus dans la nature. Chacun d'entre eux, comme le principe de moindre action, est un principe de moindre changement.

Défi 357 s

* *

En physique galiléenne, la valeur de l'action dépend de la vitesse de l'observateur, mais non de sa position ou de son orientation. Mais l'action, lorsqu'elle est correctement définie, *ne* devrait *pas* dépendre de l'observateur. Tous les observateurs devraient être d'accord sur la valeur du changement observé. Ce n'est qu'avec la relativité restreinte que l'exigence d'une action qui doit être indépendante de la vitesse de l'observateur sera satisfaite. Comment l'action relativiste sera-t-elle définie ?

Défi 358 s

* *

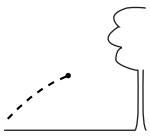
Mesurer tout le changement qui se produit dans l'univers présuppose que l'univers est un système physique. Est-ce vraiment le cas ?

Défi 359 s

* *

Un mouvement pour lequel l'action est particulièrement bien minimisée dans la nature nous est cher : la marche. De vastes efforts de recherche tentent de concevoir des robots qui reproduisent le fonctionnement et le contrôle de l'optimisation de l'énergie dans les jambes humaines. Pour un exemple, consultez le site Web de Tao Geng sur http://www.cn.stir.ac.uk/~tgeng/research.html.

Réf. 153



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Chapitre 9

MOUVEMENT ET SYMÉTRIE

La seconde manière de décrire globalement le mouvement est de le décrire de telle sorte que *tous* les observateurs s'accordent. Un objet situé sous le feu des projecteurs est qualifié de *symétrique* s'il apparaît sous le même aspect lorsqu'il est observé depuis différentes positions. Par exemple, une fleur de myosotis, dont la Figure 105 en donne une image, est symétrique parce qu'elle prend une apparence identique dès qu'on la tourne sur elle-même de 72 degrés. De nombreuses fleurs d'arbres fruitiers ont la même symétrie. Nous disons également que, sous un changement de position, la fleur possède une *propriété invariante*, à savoir sa forme. Si de telles positions possibles sont nombreuses, alors nous parlons d'une *haute* symétrie, sinon d'une *basse* symétrie. Par exemple, un trèfle à quatre feuilles possède une plus haute symétrique qu'un à trois feuilles, plus courant. Des perspectives différentes impliquent des observateurs distincts. En physique, ces points de vue sont généralement nommés des *référentiels* (physiques) et sont mathématiquement décrits par des systèmes de coordonnées*.

Une haute symétrie signifie que de nombreux observateurs font la même observation. À première vue, peu d'objets ou d'observations symétriques semblent exister dans la nature. En fait, c'est une erreur. Au contraire, nous pouvons déduire que la nature tout entière est symétrique par le simple fait que nous pouvons tous parler de celle-ci, que
Défi 360 s nous en avons tous le même point de vue ! Qui plus est, la symétrie de la nature est considérablement plus haute que celle d'une fleur de myosotis. Nous nous apercevrons que cette haute symétrie est à la base de la célèbre formule $E_0 = mc^2$.

Pourquoi pouvons-nous réfléchir et discuter ?

> « L'harmonie dissimulée est beaucoup plus profonde que celle qui est apparente. »
> Réf. 154 Héraclite d'Éphèse, environ 500 av. J.-C.

Pourquoi pouvons-nous comprendre quelqu'un lorsqu'il parle de l'univers, même si nous ne sommes pas dans ses chaussons ? Nous le pouvons pour deux raisons : parce que la plupart des choses ont une apparence *similaire* sous des angles différents, et parce que nous avons eu *préalablement*, pour la plupart, des expériences similaires.

« Similaire » signifie que ce que *nous* observons et ce que *les autres* observent concorde d'une manière ou d'une autre. En d'autres termes, de nombreux aspects des observa-

* Plus précisément, en physique, un référentiel est un système de coordonnées de l'espace-temps, composé de trois coordonnées d'espace et d'une coordonnée de temps, utilisé pour définir les notions de position, de vitesse et d'accélération [N.d.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

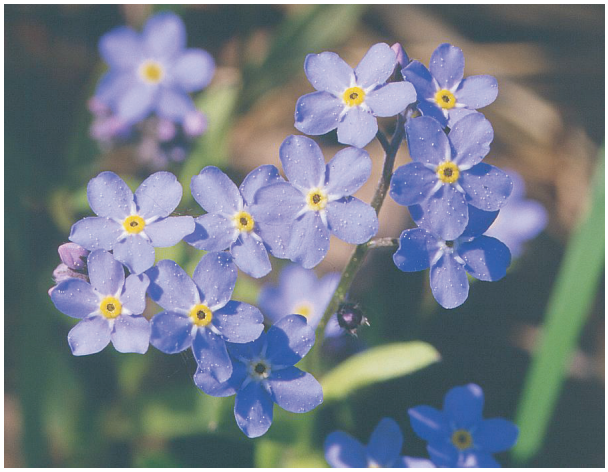


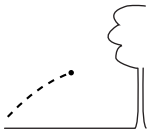
FIGURE 105 Le *myosotis* (*Boraginaceae*), aussi dénommé « Ne m'oubliez pas » dans de nombreuses langues. (© Markku Savela)

tions ne dépendent pas du point de vue. Par exemple, le nombre de pétales d'une fleur est toujours identique pour tous les observateurs. Nous pouvons donc dire que cette quantité possède la plus haute symétrie possible. Nous verrons ci-dessous que la masse en est un autre exemple semblable. Les observables qui ont la plus haute symétrie possible sont appelées des *scalaires* en physique. D'autres aspects varient d'un observateur à l'autre. Par exemple, la taille apparente fluctue avec la distance de l'observation. Cependant, la taille réelle est indépendante des observateurs. En termes généraux, n'importe quelle forme d'*indépendance des points de vue* est un modèle de symétrie, et le fait que deux individus observant la même chose depuis des positions différentes puissent se comprendre l'un et l'autre démontre que la nature est symétrique. Nous allons commencer à analyser les particularités de cette symétrie dans cette section et nous poursuivrons pendant la plupart du reste de notre promenade.

Dans le monde qui nous entoure, nous remarquons une autre propriété générale : non seulement le même phénomène apparaît comme similaire à des observateurs différents, mais aussi des phénomènes *différents* apparaissent comme similaires au *même* observateur. Par exemple, nous savons que si le feu brûle les doigts dans la cuisine, il fera de même à l'extérieur de la maison, et également à d'autres endroits et à d'autres moments. La nature exhibe l'aptitude à la *reproductibilité*. La nature ne réserve aucune surprise. En fait, notre mémoire et notre pensée ne sont possibles que grâce à cette propriété élémentaire de la nature. (Pouvez-vous le confirmer ?) Comme nous le verrons, la reproductibilité nous conduit à de fortes restrictions supplémentaires sur la description de la nature.

Défi 361 s

Sans l'indépendance des points de vue et la reproductibilité, parler aux autres ou à soi-même serait impossible. Plus important encore, nous découvrirons que l'indépendance des points de vue et la reproductibilité permettent beaucoup plus que de rendre tout simplement possible le fait de pouvoir discuter : elles fixent également le *contenu* de ce que nous pouvons nous dire. En d'autres termes, nous verrons que notre description de la nature découle logiquement, de manière pratiquement indépendante, du simple fait que nous pouvons parler de la nature à nos amis.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Points de vue

> « La tolérance... est le soupçon que l'autre pourrait avoir raison. »
> Kurt Tucholski (1890–1935), écrivain allemand.

> « La tolérance – une force que nous souhaitons principalement aux adversaires politiques. »
> Wolfram Weidner (né en 1925), journaliste allemand.

Lorsque le petit d'homme commence à rencontrer d'autres personnes durant son enfance, il s'aperçoit rapidement que certaines expériences sont partagées, alors que d'autres, comme les rêves, ne le sont pas. Apprendre à effectuer cette distinction est une des aventures de la vie humaine. Dans ces pages, nous nous focalisons sur une partie des expériences du premier type : les observations *physiques*. Toutefois, même parmi celles-ci, des distinctions doivent être effectuées. Dans la vie quotidienne, nous sommes habitués à reconnaître que les poids, les volumes, les longueurs et les durées sont indépendants du point de vue de l'observateur. Nous pouvons parler de ces quantités observées à quiconque, et il n'y a aucun désaccord à propos de leurs valeurs, à partir du moment où elles ont été correctement mesurées. Pourtant, d'autres quantités doivent dépendre de l'observateur. Imaginez que vous parliez à un ami après qu'il a sauté d'un des arbres qui jalonnent notre chemin, au moment où il est en train de chuter vers le sol. Il affirmera que le sol de la forêt se rapproche à grande vitesse, bien que vous-même prétendrez que ce sol est stationnaire. Manifestement, la différence entre ces affirmations est due à leurs points de vue discordants. La vitesse d'un objet (dans cet exemple celle du sol de la forêt ou celle de votre ami lui-même) est ainsi une propriété moins symétrique que le poids ou la taille. Tous les observateurs ne s'accordent pas sur sa valeur.

Dans le cas des observations dépendantes du point de vue, la compréhension reste toujours possible si l'on se donne un peu de peine : chaque observateur peut s'*imaginer* observer à partir de la position de l'autre, et *vérifier* si le résultat imaginé concorde avec l'affirmation de l'autre*. Si cette affirmation ainsi imaginée et la véritable affirmation de l'autre observateur coïncident, ces observations sont cohérentes, et les différences dans les formulations ne sont dues qu'à des points de vue différents. Sinon, la différence est fondamentale et ils ne peuvent pas se mettre d'accord ou se parler. En utilisant cette approche, vous pouvez même dire si les sentiments, les jugements ou les goûts des hommes proviennent de différences fondamentales ou non.

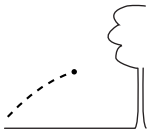
Défi 362 s

La distinction entre des quantités indépendantes du point de vue (invariantes) et d'autres dépendantes du point de vue est une distinction primordiale. Des quantités invariantes, telles que la masse ou la forme, décrivent des propriétés *intrinsèques*, et des quantités qui dépendent de l'observateur modélisent l'*état* du système. Par conséquent, nous devons impérativement répondre aux questions suivantes afin de trouver une description *complète* de l'état d'un système physique :

— Quels points de vue sont possibles ?

* Les hommes développent à l'âge d'environ quatre ans la capacité d'imaginer que d'autres peuvent se trouver dans des situations *différentes* de la leur. Par conséquent, avant cet âge, les hommes sont incapables de concevoir la relativité restreinte, après ils le peuvent.

Réf. 155



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

— Comment les descriptions se transforment-elles d'un point de vue à un autre ?
— Quelles observables ces symétries admettent-elles ?
— Qu'est-ce que ces conséquences ont à nous dire à propos du mouvement ?

Jusqu'à présent, dans la discussion, nous avons étudié des points de vue qui diffèrent selon la position, l'orientation, le temps et, encore plus important, selon le mouvement. Par rapport à chacun d'entre eux, des observateurs peuvent se trouver au repos, se déplacer à vitesse constante ou accélérer. Ces changements « concrets » de points de vue sont ceux que nous étudierons en premier. Dans ce cas, la nécessité de cohérence des observations faites par des observateurs différents est appelée le *principe de relativité*. Les symétries associées à ce type d'invariance sont nommées des symétries *externes*. Elles sont listées dans le Tableau 26.

Page 84
Page 201

Une deuxième classe de changements fondamentaux des points de vue concerne les changements « abstraits ». Des points de vue peuvent différer selon la description mathématique utilisée : de tels changements sont appelés des *changements de jauge*. Ils seront introduits pour la première fois dans la section sur l'électrodynamique. À nouveau, il est exigé que toutes les formulations soient cohérentes à travers les différentes descriptions mathématiques. Cette exigence de cohérence est appelée le *principe d'invariance de jauge*. Les symétries associées sont nommées symétries *internes*.

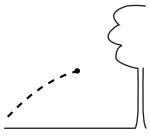
La troisième classe de changements, dont l'importance ne peut pas apparaître immédiatement dans la vie de tous les jours, est celle du comportement d'un système sous l'échange de ses parties. L'invariance associée est appelée *symétrie de permutation*. C'est une symétrie *discrète*, et nous la rencontrerons dans la seconde partie de notre aventure.

Les trois conditions de cohérence décrites ci-dessus sont appelées « principes » parce que ces formulations élémentaires sont si profondes qu'elles déterminent presque complètement les « lois » de la physique, comme nous le verrons bientôt. Un peu plus tard nous découvrirons que le fait de chercher une description complète de l'état des objets produira également une description complète de leurs propriétés *intrinsèques*. Mais nous avons eu assez d'introduction : allons directement au cœur du sujet.

Symétries et groupes

Puisque nous sommes à la recherche d'une description exhaustive du mouvement, nous avons besoin de comprendre et de décrire l'ensemble complet des symétries de la nature. On dit qu'un système est symétrique, ou qu'il possède une *symétrie*, s'il apparaît sous une forme identique lorsqu'il est observé sous différents angles. Nous disons également que ce système possède une *invariance* par rapport au changement d'un point de vue à un autre. Les changements de points de vue sont appelés *opérations de symétrie* ou *transformations*. Une symétrie est donc une transformation ou, plus généralement, un ensemble de transformations. Toutefois, elle est beaucoup plus que cela : l'application consécutive de deux opérations de symétrie est une autre opération de symétrie. Pour être plus précis, une symétrie est un ensemble $G = \{a, b, c...\}$ d'éléments, les transformations, combiné avec un opérateur binaire $\circ$ appelé *concaténation* ou *multiplication* et prononcé « suivi de » ou « fois », dans lequel les propriétés suivantes sont vérifiées pour

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



tout élément a, b et c :

$$\begin{aligned} \textit{associativité}\text{, c'est-à-dire} \quad & (a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c) \\ \text{existence d'un } \textit{élément neutre } e \text{ tel que} \quad & e \circ a = a \circ e = a \\ \text{existence d'un } \textit{élément inverse } a^{-1} \text{ tel que} \quad & a^{-1} \circ a = a \circ a^{-1} = e \quad . \end{aligned} \tag{65}$$

Tout ensemble qui vérifie ces trois propriétés déterminantes, ou axiomes, est appelé un *groupe (mathématique)*. Historiquement, la notion de groupe fut le premier exemple d'une structure mathématique définie d'une manière totalement abstraite*. Pouvez-
Défi 363 s vous donner un exemple d'un groupe choisi dans la vie quotidienne ? Comme nous le verrons, les groupes apparaissent fréquemment en physique et en mathématiques, parce
Réf. 156 que les symétries sont présentes presque partout**. Pouvez-vous donner la liste des opé-
Défi 364 s rations de symétrie qui apparaissent dans les motifs de la Figure 106 ?

Représentations

En observant un système symétrique et composé tel que celui de la Figure 106, nous
Défi 365 e remarquons que chacune de ses parties, par exemple chaque motif rouge, appartient à un ensemble d'objets identiques, généralement appelé un *multiplet*. Considéré dans son ensemble, le multiplet possède (au moins) les propriétés de symétrie du système tout entier. Pour certains des motifs colorés de la Figure 106, nous avons besoin de quatre objets pour constituer un multiplet complet, bien que pour d'autres deux suffisent, ou un seulement, comme dans le cas de l'étoile centrale. En réalité, dans chaque système symétrique, chaque partie peut être classée selon le type de multiplet auquel elle appartient. Lors de notre ascension de la montagne nous réaliserons la même classification avec chaque partie de la nature, obtenant ainsi une précision toujours croissante.

Un *multiplet* est un ensemble de parties qui se transforment les unes dans les autres selon toutes les transformations de symétrie. Les mathématiciens nomment généralement *représentations* ces multiplets abstraits. En spécifiant à quel multiplet un composant appartient, nous décrivons de quelle manière ce composant constitue une partie du système entier. Regardons comment cette classification est réalisée.

En langage mathématique, les transformations de symétrie sont fréquemment décrites par des matrices. Par exemple, dans le plan, une image symétrique (réflexion) par rapport

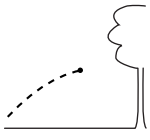
* Ce terme est dû à Évariste Galois (1811–1832), cette structuration à Augustin-Louis Cauchy (1789–1857) et cette définition axiomatique à Arthur Cayley (1821–1895).

** En principe, les groupes mathématiques ne nécessitent pas forcément d'être définis comme des groupes de symétrie, mais nous pouvons démontrer que tous les groupes peuvent être considérés comme des groupes de transformation dans un certain espace mathématique convenablement choisi. Ainsi donc en mathématiques nous pouvons utiliser les termes « groupe de symétrie » et « groupe » de manière indifférente.

Un groupe est dit *abélien* si son opération de concaténation est commutative, c'est-à-dire si $a \circ b = b \circ a$ pour tout couple d'éléments a et b. Dans cette condition, la concaténation est parfois appelée *addition*. Les rotations forment-elles un groupe abélien ?

Un sous-ensemble $G_1 \subset G$ d'un groupe G peut lui-même être un groupe ; nous parlons alors de *sous-groupe* et nous disons souvent abusivement que G est *plus grand* que G_1 ou que G est un groupe de *plus haute* symétrie que G_1.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



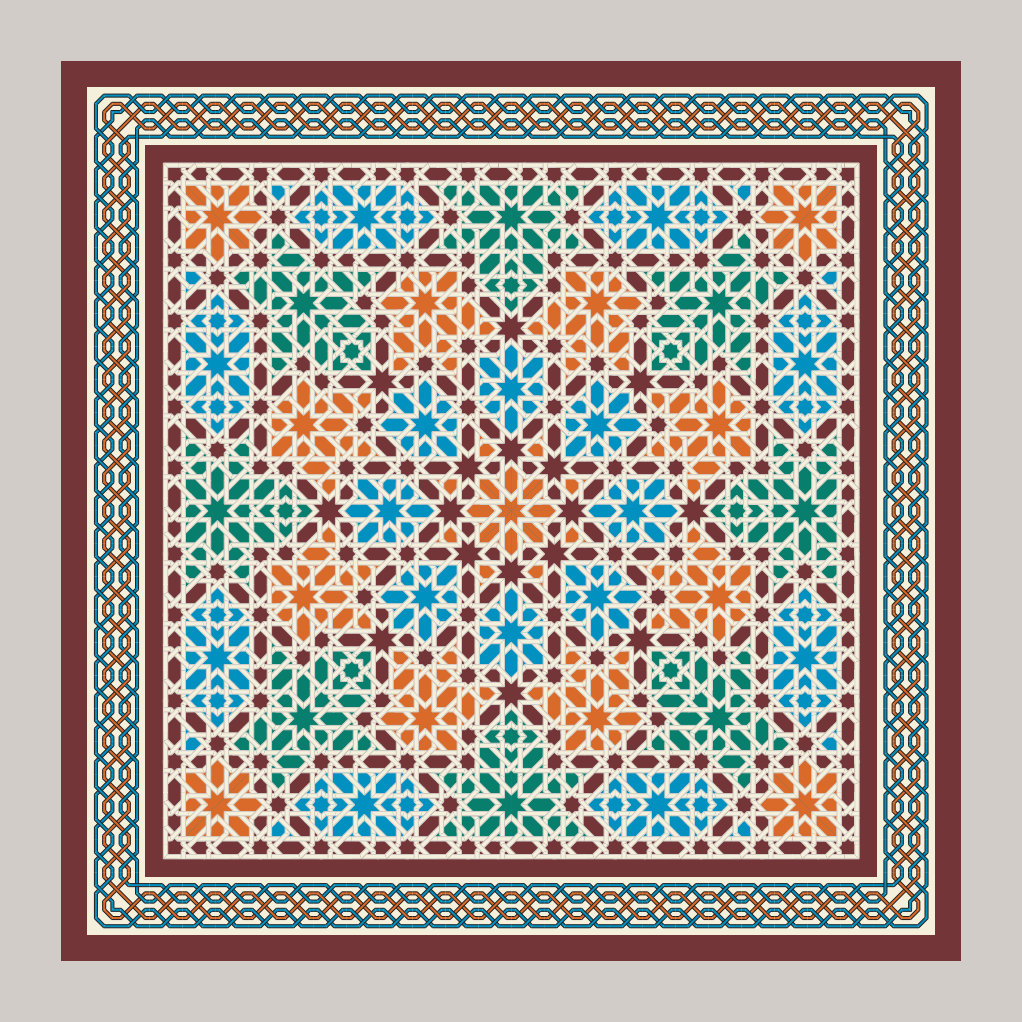


FIGURE 106 Un ornement latino–arabe dans le palais du Gouverneur à Séville. (© Christoph Schiller)

à la première diagonale de ce plan est représentée par la matrice

$$D(\text{réfl}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} , \tag{66}$$

Défi 366 e

puisque chaque point (x, y) est transformé en (y, x) lorsqu'il est multiplié par la matrice $D(\text{réfl})$. Par conséquent, pour un mathématicien, une *représentation* d'un groupe de symétrie G est une affectation d'une matrice $D(a)$ à chaque élément a du groupe telle que la représentation de la concaténation de deux éléments a et b est égale au produit de la représentation D de chaque élément :

$$D(a \circ b) = D(a)D(b) . \tag{67}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Par exemple, la matrice de l'équation (66), ainsi que les matrices associées à toutes les autres opérations de symétrie possèdent cette propriété*.

Pour chaque groupe de symétrie, la construction et la classification de toutes les représentations possibles constituent une activité importante. Celle-ci correspond à la classification de tous les multiplets possibles qu'un système symétrique peut comporter. De cette façon, la compréhension de la classification de tous les multiplets et toutes les parties qui peuvent apparaître dans la Figure 106 nous informera sur la manière d'arranger toutes les parties possibles qui peuvent composer un objet ou un exemple de mouvement !

Une représentation D est qualifiée d'*unitaire* si toutes les matrices $D(a)$ sont unitaires**. Presque toutes les représentations qui surgissent en physique, à l'exception seulement d'une poignée d'entre elles, sont unitaires : cette propriété est la plus restrictive, puisqu'elle précise que les transformations correspondantes sont des applications injectives et qu'elles sont inversibles, ce qui signifie qu'un observateur ne verra jamais plus ou moins de choses qu'un autre. Évidemment, si un observateur peut discuter avec un second, le deuxième observateur peut également parler au premier.

L'ultime propriété importante d'un multiplet, ou d'une représentation, concerne sa structure. Si un multiplet peut être vu comme étant constitué de sous-multiplets, il est qualifié de *réductible*, sinon d'*irréductible*. Le même vocabulaire s'applique aux représentations. Les représentations irréductibles ne peuvent évidemment pas être décomposées. Par exemple, le groupe de symétrie (approximatif) de la Figure 106, communément appelé D_4, possède huit éléments. Il est associé à la représentation matricielle générale exacte, unitaire et irréductible

Défi 367 e

* Il y a quelques conditions accessoires évidentes, mais importantes, pour une représentation : les matrices $D(a)$ doivent être inversibles, ou non singulières, et l'opérateur identité de G doit être associé à la matrice unité. En langage beaucoup plus concis, nous disons qu'une représentation est un *homomorphisme* de G dans le groupe des matrices inversibles ou non singulières. Une matrice D est inversible si son déterminant $\det D$ n'est pas nul.

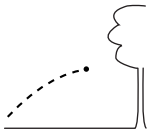
En général, si une fonction f d'un groupe G à un autre groupe G' satisfait la relation

$$f(a \circ_G b) = f(a) \circ_{G'} f(b) \,, \tag{68}$$

alors elle est appelée *homomorphisme*. Un homomorphisme f qui est à la fois injectif et surjectif est appelé un *isomorphisme*. Si une représentation est également injective, elle est qualifiée de *fidèle*, *exacte* ou *juste*.

De la même façon que pour les groupes, des structures mathématiques plus complexes comme les anneaux, les corps et les algèbres associatives peuvent également être représentées par des classes appropriées de matrices. Une représentation du corps des nombres complexes en est donnée dans l'Annexe **??**.

** La *transposée* A^T d'une matrice A est définie élément par élément par $(A^T)_{ik} = A_{ki}$. La *conjuguée complexe* A^* d'une matrice A est définie par $(A^*)_{ik} = (A_{ik})^*$. La matrice *adjointe* $A^\dagger$ d'une matrice A est définie par $A^\dagger = (A^T)^*$. Une matrice est qualifiée de *symétrique* si $A^T = A$, d'*orthogonale* si $A^T = A^{-1}$, d'*hermitienne* ou *auto-adjointe* (les deux sont synonymes dans toutes les applications physiques) si $A^\dagger = A$ (les matrices hermitiennes ont des valeurs propres réelles), et *unitaires* si $A^\dagger = A^{-1}$. Les matrices unitaires possèdent des valeurs propres de norme un. La multiplication par une matrice unitaire est une application injective, puisque l'évolution temporelle des systèmes physiques est une application d'un instant vers un autre, l'évolution est toujours décrite par une matrice unitaire. Une matrice *réelle* respecte $A^* = A$, une matrice *antisymétrique* ou *symétrique par rapport à la diagonale* est définie par $A^T = -A$, une matrice *anti-hermitienne* par $A^\dagger = -A$ et une matrice *anti-unitaire* par $A^\dagger = -A^{-1}$. Toutes les applications décrites par ces types particuliers de matrices sont injectives. Une matrice est *singulière*, c'est-à-dire non injective, si $\det A = 0$.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 25 Correspondances entre les symétries d'un ornement, d'une fleur et de la nature tout entière.

SYSTÈME	MOTIF LATINO–ARABE	FLEUR	MOUVEMENT
Structure et composants	ensemble de bandes et de motifs	ensemble de pétales, tige	trajectoire du mouvement et observables
Symétrie du système	symétrie des motifs	symétrie de la fleur	symétrie du lagrangien
Description mathématique du groupe de symétrie	D_4	C_5	en relativité galiléenne : position, orientation, instant et variations de vitesse
Invariants	nombre d'éléments d'un multiplet	nombre de pétales	nombre de coordonnées, grandeur des scalaires, vecteurs et tenseurs
Représentations des composants	types de multiplets d'éléments	types de multiplets de composants	tenseurs, y compris scalaires et vecteurs
Représentation la plus symétrique	singulet	partie de symétrie circulaire	scalaire
Représentation fidèle la plus simple	quadruplet	quintuplet	vecteur
Représentation la moins symétrique	quadruplet	quintuplet	aucune limite (tenseur de rang infini)

$$\begin{pmatrix} \cos n\frac{\pi}{2} & -\sin n\frac{\pi}{2} \\ \sin n\frac{\pi}{2} & \cos n\frac{\pi}{2} \end{pmatrix} \quad n = 0..3, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}. \tag{69}$$

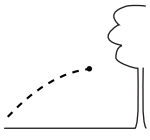
Cette représentation est un *octet*. La liste exhaustive de toutes les représentations irréductibles possibles du groupe D_4 est donnée par des *singulets*, des *couples* et des *quadruplets*. Pouvez-vous tous les repérer ? Ces représentations permettent la classification de toutes les bandes noires et blanches qui apparaissent dans la figure, ainsi que celle des motifs colorés. Les éléments les plus symétriques sont les singulets, les moins symétriques étant les membres des quadruplets. Le système complet constitue toujours un singulet.

Défi 368 pe

À l'aide de ces concepts nous sommes prêts à discuter du mouvement avec une meilleure précision.

SYMÉTRIES, MOUVEMENT ET PHYSIQUE GALILÉENNE

Chaque jour, nous faisons l'expérience que nous sommes capables de nous parler les uns aux autres à propos du mouvement. Il doit donc être possible de découvrir une quan-



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tité *invariante* qui le décrit. Nous la connaissons déjà : c'est l'*action*. Craquer une allumette est un changement. C'est le même changement qu'elle soit allumée ici ou là-bas, dans une direction ou une autre, aujourd'hui ou demain. En fait, l'action (galiléenne) est une quantité dont la valeur est la même pour chaque observateur *au repos*, indépendamment de son orientation ou de l'instant auquel il réalise son observation.

Dans le cas des motifs arabes de la Figure 106, la symétrie nous permet de déduire la liste des multiplets ou des représentations qui peuvent constituer ses éléments de base. Cette méthode doit aussi être possible pour le mouvement. Nous déduisons la classification des bandes de l'ornement arabe en singulets, couples, etc. à partir des divers angles d'observation possibles. Pour un système en mouvement, les éléments de base, correspondant aux bandes, sont les *observables*. Puisque nous considérons que la nature est symétrique sous différents changements de points de vue, nous pouvons cataloguer toutes les observables. Pour ce faire, nous avons besoin de dresser la liste de toutes les transformations de points de vue et d'en déduire l'inventaire de toutes leurs représentations.

Notre expérience quotidienne montre que le monde reste inchangé après des changements de position, d'orientation et d'instant de l'observation. Nous parlons également d'invariance par translation dans l'espace, d'invariance par rotation et d'invariance par translation du temps. Ces transformations sont différentes de celles du modèle arabe sur deux points : elles sont *continues* et elles sont *illimitées*. Ainsi, leurs représentations seront généralement continûment variables et sans frontières : elles seront des *quantités* ou des *grandeurs*. En d'autres termes, des observables seront confectionnées à l'aide de *nombres*. De cette manière nous avons justifié pourquoi des nombres sont *nécessaires* pour toute description du mouvement*.

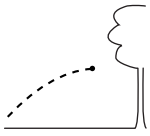
Puisque des observateurs peuvent avoir une orientation différente, la plupart des représentations seront des objets possédant une direction. En bref, la symétrie sous le changement de position, d'orientation ou d'instant de l'observation a pour conséquence que toutes les observables sont soit des « scalaires », soit des « vecteurs » ou plus généralement des « tenseurs »**.

Un *scalaire* est une quantité observable qui demeure identique pour tous les observateurs : elle correspond à un singulet. Des exemples en sont la masse ou la charge d'un objet, la distance entre deux points, la distance à l'horizon, et beaucoup d'autres. Leurs valeurs autorisées sont (généralement) continues, illimitées et sans direction. Le potentiel en un point et la température en un point sont d'autres exemples de scalaires. La vitesse n'est évidemment pas un scalaire, pas plus que la coordonnée d'un point. Pouvez-vous
Défi 370 s trouver d'autres exemples et contre-exemples ?

L'énergie est une observable énigmatique. C'est un scalaire si l'on considère uniquement des changements de lieu, d'orientation et d'instant de l'observation. Mais l'énergie n'est plus un scalaire si des changements de vitesse de l'observateur sont pris en compte. Personne n'a jamais recherché une généralisation de l'énergie telle qu'elle soit une grandeur scalaire également pour les observateurs mobiles. C'est seulement Albert Einstein qui l'a découvert, complètement par hasard. Nous reviendrons sur ce sujet bientôt.

* Contrairement aux vecteurs et aux tenseurs d'ordre plus élevé, seuls les scalaires peuvent être des quantités qui ne peuvent prendre qu'un ensemble discret de valeurs, comme +1 ou −1 seulement. Plus brièvement,
Défi 369 e seuls les scalaires peuvent être des observables *discrètes*.

** Plus tard, les *spineurs* seront ajoutés, et compléteront, cette liste.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Toute quantité qui possède une grandeur et une direction et qui « reste identique » par rapport à l'environnement après un changement de point de vue est un *vecteur*. Par exemple, la flèche qui relie deux points fixes situés sur le sol est un vecteur. Sa longueur est la même pour tous les observateurs, sa direction varie d'un observateur à l'autre, mais pas par rapport à son environnement. D'un autre côté, la flèche qui relie un arbre au lieu où un arc-en-ciel touche la terre n'est *pas* un vecteur, puisque ce lieu ne reste pas figé par rapport au milieu environnant lorsque l'observateur change.

Les mathématiciens disent que les vecteurs sont des entités orientées qui restent invariantes sous des transformations de coordonnées. Les vitesses des objets, les accélérations et la force exercée par un champ en un point sont des exemples de vecteurs. (Pouvez-
Défi 371 e vous le confirmer ?) La grandeur d'un vecteur est un scalaire : elle est la même pour tout observateur. D'ailleurs, un résultat célèbre et déconcertant des expériences réalisées au dix-neuvième siècle montra que la vitesse de la lumière n'est *pas* un vecteur pour les transformations galiléennes. Ce mystère sera résolu un peu plus tard.

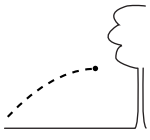
Les tenseurs sont des vecteurs généralisés. Comme exemple, prenez le moment d'inertie d'un objet. Il spécifie la dépendance du moment cinétique par rapport à la vitesse
Page 88 angulaire. Pour tout objet, le fait de doubler la grandeur de la vitesse angulaire permet de doubler la grandeur du moment cinétique ; pourtant, ces deux vecteurs ne sont pas
Page 113 parallèles l'un à l'autre si l'objet n'est pas une sphère. En général, si les grandeurs de ces deux vecteurs sont proportionnelles, dans le sens où le fait de doubler la grandeur d'un vecteur double la grandeur de l'autre, mais sans que ces deux vecteurs soient parallèles l'un à l'autre, alors le « facteur » de proportionnalité est un *tenseur* (du second ordre). Comme tous les facteurs de proportionnalité, les tenseurs ont une grandeur. En plus, les tenseurs possèdent une direction et une *forme* : ils décrivent les correspondances qui existent entre les vecteurs auxquels ils sont associés. Puisque les vecteurs sont les quantités les plus simples dotées d'une grandeur et d'une direction, alors les tenseurs sont les quantités les plus simples dotées d'une grandeur et d'une direction qui dépend d'une seconde direction choisie. Les vecteurs peuvent être visualisés comme des flèches orientées, les tenseurs peuvent l'être comme des ellipsoïdes orientés*. Pouvez-vous citer un
Défi 373 s autre exemple de tenseurs ?

Retournons à la description du mouvement. Le Tableau 25 indique que, dans des systèmes physiques, nous devons toujours discerner la symétrie du lagrangien tout entier – correspondant à la symétrie du modèle complet – de la représentation des observables – correspondant aux multiplets des rubans. Puisque l'action doit être un scalaire, et puisque toute observable doit être un tenseur, les lagrangiens contiennent des sommes

* Un tenseur de rang n est le facteur de proportionnalité situé entre un tenseur de rang 1, c'est-à-dire un vecteur, et un tenseur de rang $(n-1)$. Les vecteurs et les scalaires sont des tenseurs respectivement de rang 1 et de rang 0. Les scalaires peuvent être imaginés comme des sphères, les vecteurs comme des flèches et les tenseurs de rang 2 comme des ellipsoïdes. Les tenseurs de rang plus élevé correspondent à des formes de plus en plus complexes.

Un vecteur possède la même longueur et la même direction pour tous les observateurs, un tenseur (de rang 2) possède le même déterminant, la même trace (en algèbre linéaire, la trace d'une matrice carrée est définie comme étant la somme de ses éléments diagonaux [N.D.T.]) et la même somme de ses sous-déterminants diagonaux pour tous les observateurs.

Un vecteur est défini mathématiquement par une *liste* d'éléments, un tenseur (de rang 2) est décrit par une *matrice* d'éléments. Le rang ou l'ordre d'un tenseur détermine ainsi le nombre d'indices que possède
Défi 372 e l'observable. Pouvez-vous montrer cela ?



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

et des produits de tenseurs uniquement dans des combinaisons qui forment des scalaires. Les lagrangiens renferment donc seulement des produits scalaires ou des généralisations de ceux-ci. En résumé, les lagrangiens apparaissent toujours sous la forme

$$L = \alpha\, a_i b^i + \beta\, c_{jk} d^{jk} + \gamma\, e_{lmn} f^{lmn} + \ldots \tag{70}$$

où les indices affectés aux variables a, b, c, etc. sur lesquelles les additions sont effectuées sont toujours répétés (ainsi en général, les symboles de sommation sont tout simplement omis). Les lettres grecques représentent des constantes. Par exemple, l'action d'une particule ponctuelle libre en physique galiléenne était donnée par

$$S = \int L \, \mathrm{d}t = \frac{m}{2} \int v^2 \, \mathrm{d}t \tag{71}$$

qui est en réalité de la forme mentionnée plus haut. Nous rencontrerons de nombreux autres cas pendant notre étude du mouvement*.

Page 84

Galilée avait déjà compris que le mouvement est également invariant sous des changements de points de vue ayant des vitesses différentes. Cependant, l'action que nous venons de définir ne reflète pas cela. Il fallut quelques années pour lever le voile sur la généralisation correcte : elle est fournie par la théorie de la relativité restreinte. Avant que nous l'étudiions, nous devrons achever le présent sujet.

* Par ailleurs, la liste classique des points de vue d'observation possibles – à savoir les positions différentes, les instants d'observation différents, les orientations différentes, et les vitesses différentes – est-elle également *exhaustive* pour l'action (71) ? De façon surprenante, la réponse est non. Un des premiers qui remarqua cette

Réf. 157

particularité fut Niederer, en 1972. En étudiant la théorie quantique des particules ponctuelles, il s'aperçut que même l'action d'une particule ponctuelle libre galiléenne est invariante sous certaines autres transformations. Si les deux observateurs utilisent les coordonnées $(t, \mathbf{x})$ et (τ, ξ), l'action (71) est invariante sous

Défi 374 pe

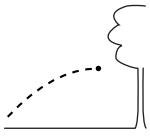
les transformations

$$\xi = \frac{\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}t}{\gamma t + \delta} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{\alpha t + \beta}{\gamma t + \delta} \quad \text{avec} \quad \mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbf{1} \quad \text{et} \quad \alpha\delta - \beta\gamma = 1 \tag{72}$$

où $\mathbf{R}$ décrit la rotation de l'orientation d'un observateur par rapport à celle de l'autre, $\mathbf{v}$ la vitesse relative entre les deux observateurs, et $\mathbf{x}_0$ le vecteur qui pointe entre les deux origines à l'instant zéro. Ce groupe renferme deux cas particuliers importants de transformations :

$$\begin{aligned} &\text{Le groupe de Galilée, connexe et statique } \xi = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}t \quad \text{et} \quad \tau = t \\ &\text{Le groupe de transformation SL(2,R) } \xi = \frac{\mathbf{x}}{\gamma t + \delta} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{\alpha t + \beta}{\gamma t + \delta}\,. \end{aligned} \tag{73}$$

Le deuxième groupe, à trois paramètres, inclut le *renversement d'espace*, les *dilatations*, la *translation du temps* et un ensemble de transformations dépendantes du temps tel que $\xi = \mathbf{x}/t$, $\tau = 1/t$ appelées *expansions*. Les dilatations et les expansions sont rarement citées puisqu'elles sont des symétries des particules ponctuelles seulement, elles ne s'appliquent pas aux objets et systèmes ordinaires. Elles réapparaîtront plus tard cependant, sous un jour encore plus important.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Reproductibilité, conservation et théorème de Noether

> J'abandonnerai ma masse, ma charge et ma quantité de mouvement à la science.
>
> Graffiti

La reproductibilité des observations, c'est-à-dire la symétrie sous le changement d'instant ou « invariance par translation du temps », est un exemple d'indépendance de point de vue. (Cela n'est pas évident, pouvez-vous trouver ses représentations irréductibles ?) Cette correspondance possède plusieurs conséquences importantes. Nous avons vu que la symétrie implique l'invariance. Il apparaît que pour des symétries *continues*, telle la symétrie de translation du temps, cette affirmation peut être exprimée de façon plus précise : pour toute symétrie continue du lagrangien, il existe une constante conservée associée pour le mouvement, et vice versa. La formulation exacte de cette correspondance est le théorème d'Emmy Noether*. Elle découvrit ce résultat en 1915 lorsqu'elle vint en aide à Albert Einstein et David Hilbert, qui étaient tous les deux en lutte et en concurrence dans l'édification de la relativité générale. Toutefois, ce résultat s'applique à n'importe quel type de lagrangien.

Défi 375 pe

Réf. 158

Noether examina des symétries continues dépendant d'un paramètre b continu. Une transformation de point de vue est une symétrie si l'action S ne dépend pas de la valeur de b. Par exemple, en modifiant la position comme suit :

$$x \mapsto x + b \tag{74}$$

on laisse l'action

$$S_0 = \int T(v) - U(x)\,\mathrm{d}t \tag{75}$$

invariante, puisque $S(b) = S_0$. Cette situation implique que

$$\frac{\partial T}{\partial v} = p = \text{const} \quad ; \tag{76}$$

en résumé, la symétrie sous le changement de position entraîne la conservation de la quantité de mouvement. L'inverse est également vrai.

Dans le cas d'une symétrie sous le décalage de l'instant de l'observation, nous trouvons

Défi 376 pe

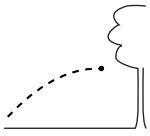
$$T + U = \text{const} \quad ; \tag{77}$$

ou, dit autrement, l'invariance par la translation du temps entraîne que l'énergie reste constante. Ici encore, l'inverse est aussi correct. Nous disons également que l'énergie et la quantité de mouvement sont des *générateurs* des translations du temps et de l'espace.

La quantité conservée pour une symétrie continue est parfois appelée la *charge de Noether*, parce que le mot *charge* est utilisé en physique théorique pour désigner des ob-

* Emmy Noether (n. Erlangen 1882, d. Bryn Mayr 1935), mathématicienne allemande. Ce théorème ne constitua qu'une activité secondaire dans sa carrière qu'elle voua principalement à la théorie des nombres. Le théorème s'applique également aux symétries de jauge, où il établit que, pour chaque symétrie de jauge, est associée une identité pour l'équation du mouvement et vice versa.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



servables étendues conservées. Donc, l'énergie et la quantité de mouvement sont des charges de Noether. La « charge électrique », la « charge gravitationnelle » (ou masse) et la « charge topologique » en sont des exemples courants. Quelle est la charge conservée pour l'invariance par rotation ?

Défi 377 s

Nous remarquons que l'expression « l'énergie est conservée » a plusieurs significations. Avant tout, elle signifie que l'énergie d'une particule libre *unique* est constante au cours du temps. Ensuite, elle veut dire que l'énergie totale de n'importe quel nombre de particules indépendantes est constante. Finalement, elle indique que l'énergie d'un *système* de particules, c'est-à-dire en incluant leurs interactions, est constante au cours du temps. Les collisions sont des exemples de ce dernier cas. Le théorème de Noether rend compte à la fois de toutes ces situations, comme vous pouvez le vérifier en utilisant les lagrangiens correspondants.

Défi 378 e

Mais le théorème de Noether formule également, ou plutôt renouvelle, une vérité encore plus profonde : si l'énergie n'était pas conservée, le temps ne pourrait être défini. La description intégrale de la nature requiert l'existence de quantités conservées, comme nous l'avons remarqué lorsque nous avons introduit les concepts d'objet, d'état et d'environnement. Par exemple, nous avons alors défini les objets comme des entités *permanentes*, entendez comme des entités caractérisées par des quantités conservées. Nous avons également vu que l'introduction du temps est possible uniquement parce que dans la nature il « n'y a pas de surprises ». Le théorème de Noether évoque précisément à quoi une telle « surprise » devrait ressembler : la non-conservation de l'énergie. Quoi qu'il en soit, les bonds d'énergie n'ont jamais été observés – même pas, non plus, à l'échelle quantique.

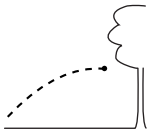
Page 25

Page 164

Puisque les symétries sont si importantes pour la description de la nature, le Tableau 26 fournit un panorama de toutes les symétries de la nature que nous rencontrerons. Leurs principales propriétés sont également listées. Excepté pour celles qui sont marquées comme « approximatives » ou « spéculatives », une preuve expérimentale de l'inexactitude de n'importe laquelle d'entre elles constituerait en réalité un véritable coup de théâtre.

TABLEAU 26 Les symétries de la relativité et de la théorie quantique avec leurs propriétés, ainsi que la liste complète des *inductions* logiques utilisées dans ces deux domaines.

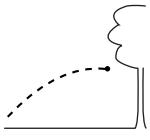
Symétrie	Type [nb de paramètres]	Espace d'action	Groupe topologie	Représentations possibles	Quantité conservée	Vide / matière asymétrique	Effet principal
Symétries externes, d'espace-temps ou géométriques							
Translation d'espace et de temps	$R \times R^3$ [4 par.]	espace, temps	non compact	scalaires, vecteurs	quantité de mouvement et énergie	oui/oui	autorise le quotidien
Rotation	SO(3) [3 par.]	espace	S^2	tenseurs	quantité de mouvement	oui/oui	communication



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

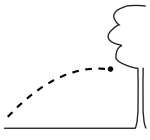
Symétrie	Type [nb de paramètres]	Espace d'action	Groupe topologie	Représentations possibles	Quantité conservée	Vide / matière asymétrique	Effet principal
Impulsion de Galilée	R^3 [3 par.]	espace, temps	non compact	scalaires, vecteurs, tenseurs	vitesse du centre de masse	oui/aux vitesses faibles	relativité du mouvement
Lorentz	Lie homogène SO(3,1) [6 par.]	espace-temps	non compact	tenseurs, spineurs	énergie-quantité de mouvement $T^{\mu\nu}$	oui/oui	vitesse de la lumière constante
Poincaré ISL(2,C)	Lie non homogène [10 par.]	espace-temps	non compact	tenseurs, spineurs	énergie-quantité de mouvement $T^{\mu\nu}$	oui/oui	
Invariance par dilatation	R^+ [1 par.]	espace-temps	rayon	n-dimen. continuum	aucune	oui/non	particules sans masse
Invariance conforme spéciale	R^4 [4 par.]	espace-temps	R^4	n-dimen. continuum	aucune	oui/non	particules sans masse
Invariance conforme	[15 par.]	espace-temps	compliqué	tenseurs, spineurs sans masse	aucune	oui/non	invariance du cône de lumière
Symétries dynamiques, dépendantes des interactions : la gravitation							
Gravité en $1/r^2$	SO(4) [6 par.]	espace des config.	comme SO(4)	couple de vecteurs	direction du périhélie	oui/oui	orbites fermées
Invariance par difféomorphisme	[∞ par.]	espace-temps	compliqué	espace-temps	énergie–quantité de mouvement local	oui/non	avancée du périhélie
Symétries dynamiques, du mouvement classique et de la mécanique quantique							
Mouvement par inversion T (« temps »)	discret	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair, impair	parité T	oui/non	réversibilité

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Symétrie	Type [nb de paramètres]	Espace d'action	Groupe topologie	Représentations possibles	Quantité conservée	Vide / matière asymétrique	Effet principal
Parité par inversion P (« spatiale »)	discret	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair, impair	parité P	oui/non	les mondes miroirs existent
Conjugaison de charge C	globale, anti-linéaire, anti-hermitienne	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair, impair	parité C	oui/non	les antiparticules existent
CPT	discret	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair	parité CPT	oui/oui	rend la théorie des champs possible
Symétries de jauge dynamiques, dépendantes des interactions							
Invariance de jauge électromagnétique classique	[∞ par.]	espace de champs	non important	non important	charge électrique	oui/oui	lumière sans masse
Invariance de jauge électromagnétique quantique	Lie U(1) abélien [1 par.]	espace de Hilbert	cercle S^1	champs	charge électrique	oui/oui	photon sans masse
Dualité électromagnétique	Lie U(1) abélien [1 par.]	espace de champs	cercle S^1	abstrait	abstrait	oui/non	aucun
Jauge faible	Lie SU(2) non abélien [3 par.]	espace de Hilbert	comme $SU(3)$	particules	charge faible	non/ approx.	
Jauge de couleur	Lie SU(3) non abélien [8 par.]	espace de Hilbert	comme $SU(3)$	quarks de couleur	couleur	oui/oui	gluons sans masse
Symétrie chirale	discret	fermions	discret	gauche, droite	hélicité	à peu près	fermions « sans masse »[a]

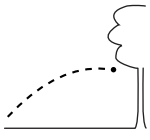
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Symétrie	Type [nb de paramètres]	Espace d'action	Groupe topologie	Représentations possibles	Quantité conservée	Vide / matière asymétrique	Effet principal
Symétries de permutation							
Échange de particule	discret	espace de Fock etc.	discret	fermions et bosons	aucune	n.a./oui	paradoxe de Gibbs
Sélection de symétries *spéculative* de la nature							
GUT	E_8, SO(10)	Hilbert	à partir du groupe de Lie	particules	à partir du groupe de Lie	oui/non	convergence de la constante de couplage
Supersymétrie N[b]	globale	Hilbert		particules, s-particules	T_{mn} et N spineurs [c] Q_{imn}	non/non	particules « sans masse »[a]
Parité R	discret	Hilbert	discret	+1, -1	parité R	oui/oui	sfermions, jauginos
Symétrie de tresse	discret	son propre espace	discret	vague	vague	oui/peut-être	vague
Dualité espace-temps	discret	tous	discret	le vide	vague	oui/peut-être	masses fixes des particules
Symétrie d'événement	discret	espace-temps	discret	la nature	aucune	oui/non	vague

Pour des détails concernant les relations entre la symétrie et l'induction logique, voyez la page **??**.
L'explication des termes utilisés dans le tableau sera complétée tout au long de notre promenade.
Les nombres réels sont symbolisés par R.
a. Seulement approximativement, « sans masse » signifie que $m \ll m_{Pl}$, c'est-à-dire que $m \ll 22\,\mu g$.
b. La supersymétrie $N = 1$, mais pas la supergravité $N = 1$, est probablement une bonne approximation pour la nature aux énergies rencontrées.
c. $i = 1..N$.

En résumé, puisque nous pouvons *parler* de la nature, nous pouvons déduire plusieurs de ses symétries, en particulier sa symétrie sous les translations de temps et d'espace. À partir des symétries naturelles, en utilisant le théorème de Noether, nous pouvons déduire les charges conservées telles que l'énergie ou les moments cinétique et de translation. En d'autres termes, les définitions de masse, d'espace et de temps, associées à leurs



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

propriétés de symétrie, sont *équivalentes* à la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. La conservation et la symétrie sont deux manières d'exprimer la même propriété de la nature. Pour le dire simplement, notre aptitude à parler de la nature signifie que l'énergie et la quantité de mouvement sont conservées.

En général, la manière la plus élégante pour dévoiler les « lois » de la nature consiste à rechercher des symétries naturelles. À plusieurs reprises au cours de l'Histoire, chaque fois que cette relation a été comprise, la physique a réalisé des progrès notables. Par exemple, Albert Einstein découvrit la théorie de la relativité de cette façon, et Paul Dirac donna naissance à l'électrodynamique quantique. Nous utiliserons la même méthode tout au long de notre marche, dans sa troisième partie nous découvrirons certaines symétries qui sont encore plus fantastiques que celles de la relativité. Maintenant, cependant, nous allons continuer par l'approche suivante de la description globale du mouvement.

Curiosités et défis amusants sur la symétrie du mouvement

Quel est le trajet suivi par quatre tortues partant des quatre angles d'un carré, si chacune d'elles marche continuellement à la même vitesse en direction de sa voisine de gauche (ou de droite) ?
Défi 379 pe

* *

Quelle est la symétrie d'une oscillation simple ? Et celle d'une onde ?
Défi 380 s

* *

Pour quels systèmes le renversement du mouvement est-il une transformation symétrique ?
Défi 381 s

* *

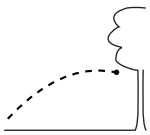
Quelle est la symétrie d'une rotation continue ?
Défi 382 pe

* *

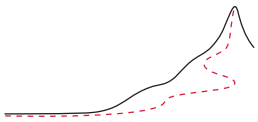
Une sphère possède un tenseur pour le moment d'inertie qui est diagonal avec trois nombres égaux. La même chose est vraie pour le cube. Pouvez-vous distinguer les sphères des cubes par leur comportement sous une rotation ?
Défi 383 pe

* *

Existe-t-il dans la nature un mouvement dont la symétrie est parfaite ?
Défi 384 pe



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 10

MOUVEMENTS ÉLÉMENTAIRES DES CORPS ÉTENDUS – VIBRATIONS ET ONDES

Nous avons défini l'action, et donc le changement, comme étant l'intégrale du lagrangien, et le lagrangien comme la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Une masse m attachée à un ressort représente un des systèmes les plus simples dans la nature. Son lagrangien est donné par

$$L = \frac{1}{2}mv^2 - kx^2 \,, \tag{78}$$

où k représente une quantité caractérisant le ressort, dénommée constante du ressort. Ce lagrangien est dû à Robert Hooke, au dix-septième siècle. Pouvez-vous démontrer son résultat ?

Défi 385 e

Le mouvement qui résulte de ce lagrangien est périodique, comme indiqué sur la Figure 107. Le lagrangien décrit l'oscillation de la longueur du ressort. Ce mouvement est exactement identique à celui d'un long pendule. Il est baptisé *mouvement harmonique*, parce qu'un objet vibrant rapidement de cette manière produit un son musical complètement pur – ou harmonique. (L'instrument de musique qui produit les ondes harmoniques les plus pures est la flûte traversière. Cet instrument fournit donc la meilleure idée du « chant » du mouvement harmonique.) Le graphe d'une oscillation harmonique ou linéaire, montrée sur la Figure 107, est appelé une *courbe de sinus*. Elle peut être vue comme étant l'élément fondamental de toute oscillation. Toutes les autres, les oscillations non harmoniques dans la nature, peuvent être reconstituées à partir des courbes de sinus, comme nous allons le voir bientôt.

Page 208

Chaque mouvement oscillant transforme continuellement de l'énergie cinétique en énergie potentielle et vice versa. C'est le cas pour les marées, le pendule ou pour tout récepteur radiophonique. Cependant de nombreuses oscillations s'atténuent également au cours du temps : elles sont amorties. Des systèmes dotés d'une *grande* capacité d'amortissement, tels que les pare-chocs des voitures, sont utilisés pour étouffer les vibrations. Des systèmes ayant un amortissement *minuscule* sont utiles dans la conception des horloges précises et autonomes sur une longue durée. La quantification la plus simple du taux d'amortissement est le nombre d'oscillations qu'un système utilise pour réduire son amplitude à $1/e \approx 1/2,718$ fois sa valeur initiale. Ce nombre caractéristique est baptisé le *facteur* Q, d'après l'abréviation de « facteur de qualité ». Un facteur Q pauvre est inférieur ou égal à 1, un de qualité excellente est supérieur ou égal à 100 000. (Pouvez-vous écrire un lagrangien simple pour un oscillateur amorti d'un facteur Q donné ?)

Défi 386 pe

Dans la nature, les oscillations amorties ne conservent généralement pas une fréquence

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

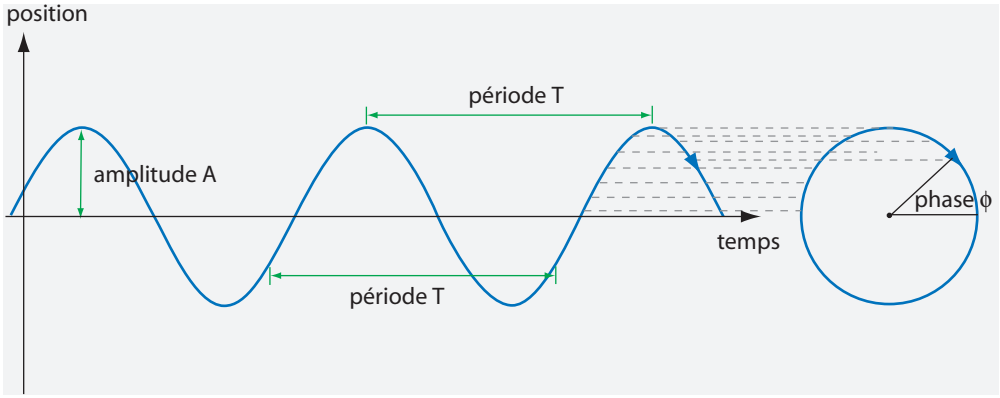


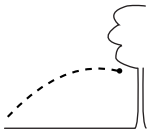
FIGURE 107 L'oscillation la plus simple.

TABLEAU 27 Quelques valeurs de fréquence mécanique relevées dans la nature.

OBSERVATION	FRÉQUENCE
Fréquences sonores dans les gaz émis par les trous noirs	≈ 1 fHz
Précision dans les fréquences de vibration mesurées du Soleil	jusqu'à 2 nHz
Fréquences de vibration du Soleil	jusqu'à env. 300 nHz
Fréquences des vibrations qui perturbent la détection des ondes gravitationnelles	jusqu'à 3 µHz
Fréquence de vibration la plus faible sur la Terre Réf. 159	309 µHz
Fréquence de résonance de l'estomac et des organes internes (donnant l'expérience du « bruit dans le ventre »)	1 à 10 Hz
Battement d'aile d'une mouche minuscule	≈ 1 000 Hz
Son audible pour les jeunes êtres humains	20 Hz à 20 kHz
Sonar utilisé par les chauves-souris	jusqu'à plus de 100 kHz
Sonar utilisé par les dauphins	jusqu'à 150 kHz
Fréquence sonore utilisée dans l'imagerie ultrasonore	jusqu'à 15 MHz
Fréquences (sonores) des phonons mesurées dans des cristaux simples	jusqu'à 20 THz et plus

constante, toutefois, pour le pendule simple, cela reste le cas à un haut degré d'exactitude. La raison en est que, pour un pendule, la fréquence d'oscillation ne dépend pas significativement de l'amplitude (tant que l'amplitude de l'oscillation est inférieure à 20° environ). C'est la raison pour laquelle les pendules sont utilisés comme oscillateurs dans les horloges mécaniques.

Bien évidemment, pour une horloge excellente, le comportement des oscillations ne doit pas seulement dénoter un amortissement faible, mais doit également être indépendant de la température et être insensible à toute autre influence extérieure. L'introduction des cristaux de quartz en tant qu'oscillateurs a constitué un progrès notable du vingtième siècle. Techniquement, le quartz est constitué de cristaux de la taille de quelques grains de sable, qui peuvent être mis en oscillation en appliquant un signal électrique. Le quartz possède une faible dépendance à la température et un grand facteur Q ; de plus, comme il consomme peu d'énergie, des horloges précises peuvent désormais fonction-



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

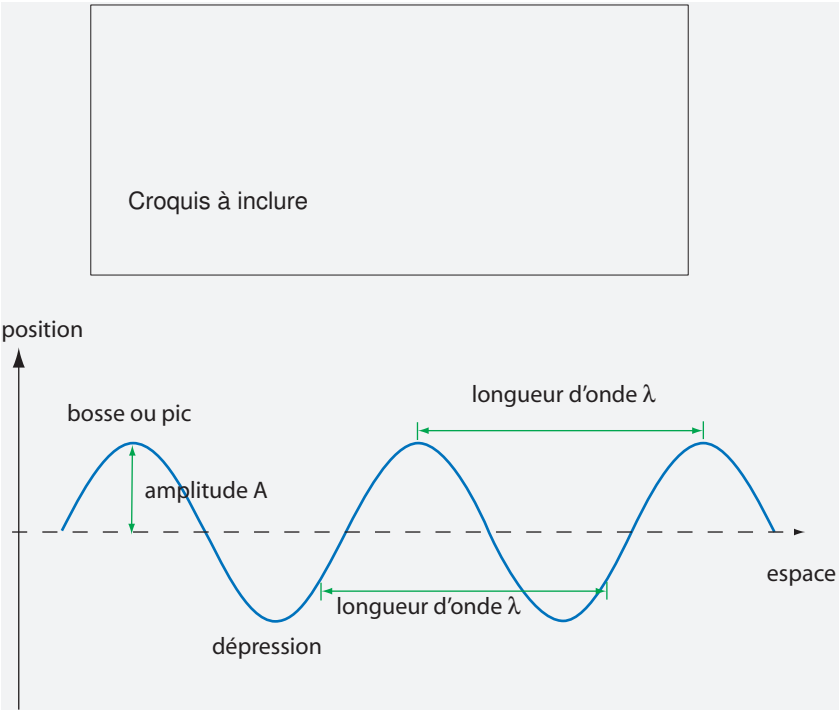


FIGURE 108 Décomposition d'une onde, ou d'un signal en général, en ondes harmoniques

ner à l'aide de petites batteries.

Chaque oscillation harmonique est décrite par trois grandeurs : l'*amplitude*, la *période* (l'inverse de la fréquence) et la *phase*. La phase différencie des oscillations de même amplitude et de même période : elle définit à quel moment l'oscillation commence. La Figure 107 révèle comment une oscillation harmonique est associée à une rotation imaginaire. Par conséquent, la phase est décrite de manière adéquate par un angle compris entre 0 et 2π.

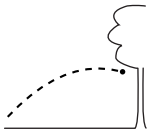
Tous les systèmes qui oscillent émettent également des ondes. En réalité, les vibrations apparaissent uniquement dans les systèmes étendus, et les oscillations sont simplement les mouvements les plus élémentaires des systèmes étendus. Le mouvement général répétitif d'un système étendu est l'onde.

Les ondes et leur mouvement

Les ondes sont des inhomogénéités en déplacement ou, de manière équivalente, des vibrations en déplacement. Les ondes se déplacent bien que le milieu environnant soit immobile. Toute onde peut être vue comme étant une superposition d'ondes *harmoniques*. Pouvez-vous décrire la différence dans la forme de l'onde entre un ton pur harmonique, un son musical, un bruit et une explosion ? Chaque effet sonore peut être imaginé comme étant constitué d'ondes harmoniques. Celles-ci, également appelées *ondes sinusoïdales* ou *ondes linéaires*, sont les éléments fondamentaux sur lesquels tous les mouvements internes d'un corps étendu sont bâtis.

Défi 387 e

Chaque onde harmonique est caractérisée par une *fréquence* d'oscillation, une *vitesse*



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 28 Quelques vitesses d'ondes.

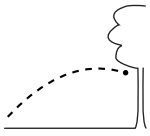
ONDE	VITESSE
Tsunami	environ 200 m/s
Son dans la plupart des gaz	0,3 km/s
Son dans l'air à 273 K	331 m/s
Son dans l'air à 293 K	343 m/s
Son dans l'hélium à 293 K	1,1 km/s
Son dans la plupart des liquides	1,1 km/s
Son dans l'eau à 273 K	1,402 km/s
Son dans l'eau à 293 K	1,482 km/s
Son dans l'or	4,5 km/s
Son dans l'acier	5,790 km/s
Son dans le granit	5,8 km/s
Son dans le verre	5,9 km/s
Son dans le béryllium	12,8 km/s
Son dans le bore	jusqu'à 15 km/s
Son dans le diamant	jusqu'à 18 km/s
Son dans un fullerène (C_{60})	jusqu'à 26 km/s
Onde plasma dans InGaAs	600 km/s
Lumière dans le vide	$2{,}998 \cdot 10^8$ m/s

de propagation, une *longueur d'onde* et une *phase*, comme on peut le deviner à partir de la Figure 108. Des ondes de faible amplitude sur l'eau montrent cela plus clairement. Dans une onde harmonique, chaque position réalise une oscillation harmonique. La phase d'une onde précise la position d'un point de l'onde (ou d'une crête) à un instant donné. C'est un angle compris en 0 et 2π. Comment la fréquence et la longueur d'onde sont-elles reliées dans une onde ?

Défi 388 e

Les ondes surviennent à l'intérieur de tous les corps *étendus*, qu'ils soient solides, liquides, gazeux ou sous forme de plasmas. À l'intérieur des corps fluides, les ondes sont *longitudinales*, ce qui signifie que le mouvement de l'onde est dans la même direction que son oscillation. Le son qui se propage dans l'air est un exemple d'onde longitudinale. À l'intérieur des corps solides, les ondes peuvent également être *transverses*, dans ce cas la vibration de l'onde est perpendiculaire à la direction de propagation.

Des ondes apparaissent aussi aux *interfaces* entre des corps : les interfaces eau–air sont des cas bien étudiés. Même une interface eau de mer–eau douce, que l'on appelle *eaux mortes*, révèle des ondes : elles peuvent apparaître même si la surface supérieure de l'eau est immobile. N'importe quel vol dans un avion fournit aussi une opportunité d'étudier les empilements réguliers de nuages à l'interface entre les couches d'air chaud et froid dans l'atmosphère. Les ondes sismiques qui se propagent le long des limites entre le plancher des océans et l'eau de mer sont également bien comprises. Les ondes de surface générales ne sont habituellement ni longitudinales ni transverses, mais un mélange des deux.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

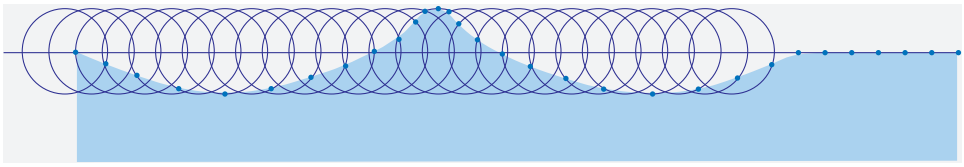


FIGURE 109 La formation d'ondes de gravité sur l'eau.

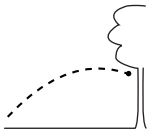
Concernant les surfaces liquides, nous classifions les ondes en fonction de la force nécessaire pour restituer une surface plane. Le premier type, les *ondes de tension superficielle*, joue un rôle à des échelles allant jusqu'à quelques centimètres. À des échelles plus grandes, la gravité prend le dessus et est la principale force de rétablissement, ainsi nous parlons des *ondes de gravité*. C'est sur ce dernier type que nous allons nous concentrer ici. Les ondes de gravité dans l'eau, au contraire des ondes de tension superficielle, ne sont pas sinusoïdales en raison de la manière particulière dont l'eau se déplace dans une telle onde. Comme indiqué sur la Figure 109, la surface de l'eau décrit une courbe engendrée par un point situé sur un cercle qui roule, ce qui provoque la forme caractéristique et asymétrique de l'onde avec une courte crête pointue et de longues dépressions peu profondes. (Tant qu'il n'y a pas de vent et que le sol sous l'eau est horizontal, les ondes sont également symétriques par une réflexion d'avant en arrière.)

Pour des ondes de gravité dans l'eau, comme pour nombre d'autres ondes, la vitesse dépend de la longueur d'onde. En fait, la vitesse c des vagues dépend de la longueur d'onde λ et de la profondeur d de l'eau de la manière suivante :

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}} \,, \tag{79}$$

où g est l'accélération due à la gravité (et en supposant que l'amplitude est beaucoup plus petite que la longueur d'onde). La formule indique deux régimes limites. Premièrement, des vagues courtes et profondes apparaissent quand la profondeur de l'eau est plus grande que la moitié de la longueur d'onde. Pour des *vagues profondes*, la vitesse de phase est $c \approx \sqrt{g\lambda/2\pi}$, donc dépendante de la longueur d'onde, et la vitesse de groupe est environ égale à la moitié de la vitesse de phase. Des vagues moins profondes sont donc plus lentes. Deuxièmement, des *vagues longues* et peu profondes apparaissent lorsque la profondeur est inférieure à 5 % de la longueur d'onde. Dans ce cas, $c \approx \sqrt{gd}$, il n'y a aucune dispersion et la vitesse de groupe est à peu près égale à la vitesse de phase. Les vagues peu profondes les plus impressionnantes sont les tsunamis, ces vagues énormes déclenchées par des tremblements de terre sous-marins. (Ce mot japonais est composé de *tsu*, signifiant port, et *nami*, signifiant onde.) Puisque les tsunamis sont des ondes peu profondes, ils possèdent une faible dispersion et peuvent ainsi voyager sur de longues distances : ils peuvent faire plusieurs fois le tour de la Terre. Les temps d'oscillation caractéristiques sont compris entre 6 et 60 minutes, donnant des longueurs d'ondes comprises entre 70 et 700 km et des vitesses au large de 200 à 250 m/s, identiques à celle d'un avion à réaction. Leur amplitude au large est fréquemment de l'ordre de 10 cm ; toutefois, des échelles d'amplitudes variant avec la profondeur d comme $1/d^4$ et s'élevant jusqu'à 40 m ont été mesurées sur la terre ferme. Ce fut l'ordre de grandeur de l'énorme tsunami désastreux

Défi 389 e



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

observé dans l'océan Indien le 26 décembre 2004.

Des ondes peuvent également se propager dans l'espace vide. Les ondes lumineuses et gravitationnelles en sont deux exemples. L'exploration de l'électromagnétisme et de la relativité nous en dira plus sur leurs propriétés.

Toute étude du mouvement doit incorporer celle du mouvement ondulatoire. Nous savons par expérience que les ondes peuvent frapper ou même endommager des cibles, donc chaque onde transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement, bien que (en moyenne) aucune matière ne se déplace le long de la direction de propagation de l'onde. L'*énergie E* d'une onde est la somme de ses énergies cinétique et potentielle. La densité d'énergie cinétique dépend de la variation temporelle du déplacement u en un point donné : des ondes qui oscillent rapidement transportent une énergie cinétique plus importante. La densité d'énergie potentielle dépend du gradient du déplacement, c'est-à-dire de sa variation spatiale : des ondes resserrées et étroites emportent une énergie potentielle plus grande que celles qui sont plus allongées. (Pouvez-vous expliquer pourquoi l'énergie potentielle ne dépend pas directement du déplacement lui-même ?) Pour des ondes harmoniques se propageant le long de la direction z, chaque type d'énergie est proportionnel au carré de la variation de son déplacement respectif :

Défi 390 s

Réf. 160

$$E \sim (\frac{\partial u}{\partial t})^2 + v^2(\frac{\partial u}{\partial z})^2 \,. \tag{80}$$

Défi 391 pe Comment la densité d'énergie est-elle reliée à la fréquence ?

La *quantité de mouvement* d'une onde est dirigée le long de sa direction de propagation. La valeur de la quantité de mouvement dépend à la fois de la variation spatiale et temporelle du déplacement u. Pour des ondes harmoniques, la densité P de la quantité de mouvement est proportionnelle au produit de ces deux quantités :

$$P_z \sim \frac{\partial u}{\partial t}\frac{\partial u}{\partial z} \,. \tag{81}$$

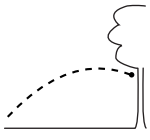
Lorsque deux trains d'ondes linéaires se heurtent ou interfèrent, la quantité de mouvement totale est conservée durant toute la collision. Une conséquence importante de la conservation de la quantité de mouvement est que les ondes qui sont réfléchies par un obstacle le sont avec un angle de réflexion égal à l'opposé de l'angle d'incidence par rapport à la normale à la surface. Que se passe-t-il pour la phase ?

Défi 392 s

Les ondes, comme les corps mobiles, transportent de l'énergie et de la quantité de mouvement. En termes simples, si vous hurlez contre un mur, le mur est frappé. Ces collisions, par exemple, peuvent donner naissance à des avalanches sur les pentes montagneuses enneigées. De la même manière, les ondes, comme les corps, peuvent emporter du moment cinétique. (Quel type d'onde est nécessaire pour que cela soit possible ?) Toutefois, nous pouvons distinguer six propriétés principales qui permettent de distinguer le mouvement des ondes du mouvement des corps.

Défi 393 pe

— Les ondes peuvent se cumuler ou s'annuler l'une et l'autre, elles peuvent donc s'interpénétrer. Ces effets, dénommés *superposition* et *interférence*, sont fortement liés à la linéarité de la plupart des ondes.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

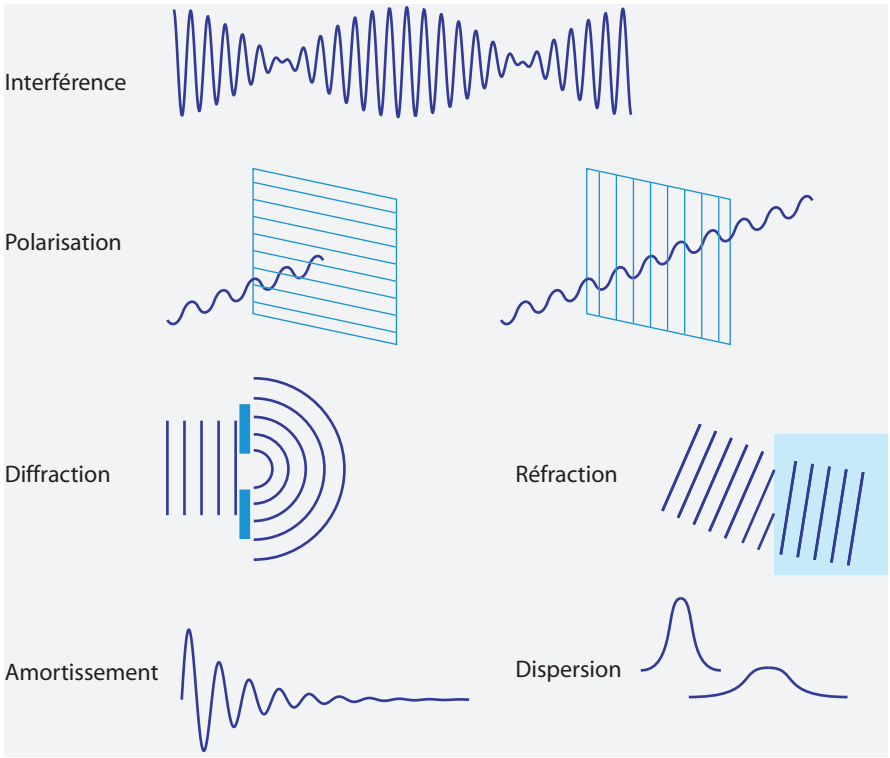


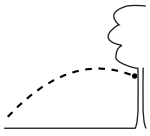
FIGURE 110 Les six principales propriétés du mouvement des ondes.

— Les ondes transverses en trois dimensions peuvent osciller dans des directions différentes : elles présentent une *polarisation*.
— Les ondes, comme le son, peuvent traverser les interfaces et se propager d'un milieu à un autre. C'est la *diffraction*.
— Les ondes changent de direction lorsqu'elles changent de milieu. C'est la *réfraction*.
— Les ondes peuvent avoir une vitesse de propagation dépendante de la fréquence. C'est la *dispersion*.
— Souvent, l'amplitude d'une onde décroît avec le temps : les ondes subissent un *amortissement*.

Dans la vie courante, les corps matériels ne se comportent pas de ces manières-là lorsqu'ils se déplacent. Ces six effets ondulatoires surgissent parce que le mouvement d'une onde est associé au mouvement des entités *étendues*. L'illustre débat qui fit rage pour savoir si les électrons ou la lumière sont des ondes ou des particules nous somme de vérifier si ces effets spécifiques aux ondes peuvent être observés ou non. C'est un sujet de la théorie quantique. Avant que nous l'étudiions, pouvez-vous citer un exemple d'une observation qui implique qu'un certain mouvement ne peut certainement pas être une onde ?

Défi 394 s

Après avoir mis en lumière la fréquence f et la vitesse de propagation v, nous voyons que toutes les ondes sinusoïdales sont caractérisées par la distance λ entre deux crêtes ondulatoires voisines : cette distance est appelée la longueur d'onde. Toutes les ondes



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vérifient la relation primaire

$$\lambda f = v \,. \tag{82}$$

Dans de nombreuses situations, la vitesse v d'une onde dépend de sa longueur d'onde. C'est le cas pour les vagues. Cette variation de vitesse avec la longueur d'onde est appelée *dispersion*. Par opposition, la vitesse du son dans l'air ne dépend pas de la longueur d'onde (à un haut niveau d'exactitude). Le son dans l'air ne montre pratiquement aucune dispersion. En réalité, s'il y avait de la dispersion pour le son, nous ne pourrions pas nous entendre parler les uns les autres à de grandes distances.

Dans la vie quotidienne, nous ne percevons pas la lumière comme une onde, parce que sa longueur d'onde n'est que d'un demi-millième de millimètre environ. Pourtant la lumière affiche les six effets caractéristiques du mouvement d'une onde. Un arc-en-ciel, par exemple, ne peut être compris entièrement que lorsque les cinq derniers effets ondulatoires sont pris en considération. La diffraction et l'interférence peuvent même être observées simplement avec vos doigts. Pouvez-vous dire comment ?

Page ??

Défi 395 s

Comme chaque oscillation anharmonique, une onde anharmonique peut être décomposée en ondes sinusoïdales. La Figure 108 en fournit quelques exemples. Si les diverses ondes sinusoïdales contenues dans une perturbation se propagent différemment, l'onde originale se déformera durant le trajet. C'est la raison pour laquelle un écho ne résonne pas exactement comme le son original ; pour la même raison, un grondement de tonnerre situé tout près se fait entendre différemment d'un grondement plus lointain.

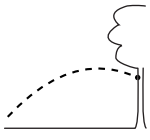
Tous les systèmes qui oscillent émettent également des ondes. Chaque récepteur radio ou TV contient des oscillateurs. Par conséquent, n'importe quel récepteur de ce type est aussi un (faible) émetteur. En réalité, dans certains pays, les autorités poursuivent les individus qui écoutent des émissions radiophoniques et qui enfreignent l'interdiction d'écouter les ondes radio émises par ces appareils. De la même façon, à l'intérieur de l'oreille humaine, une foule de minuscules structures, les cellules ciliées, oscillent. Par conséquent, l'oreille doit également émettre du son. Cette prédiction, faite en 1948 par Tommy Gold, fut confirmée uniquement en 1979 par David Kemp. Ces susnommées *émissions otoacoustiques* peuvent être détectées par le truchement de délicats microphones. Elles sont actuellement en cours d'étude pour élucider le fonctionnement encore incompris de l'oreille et pour diagnostiquer diverses maladies auditives sans nécessairement recourir à la chirurgie.

Réf. 161

Puisque toute perturbation mobile peut être décomposée en ondes sinusoïdales, le mot « onde » est utilisé par les physiciens pour désigner toutes ces fluctuations ambulantes, qu'elles ressemblent ou non à des ondes sinusoïdales. En fait, ces perturbations n'ont même pas forcément besoin de voyager. Prenez une onde statique : est-elle une onde ou une oscillation ? Les ondes statiques ne voyagent pas, elles sont des oscillations. Mais une onde statique peut être vue comme la superposition de deux ondes voyageant dans des directions opposées. Puisque toutes les oscillations sont des ondes statiques (pouvez-vous le confirmer ?), nous pouvons dire que toutes les oscillations sont des formes particulières d'ondes.

Défi 396 pe

Les perturbations mobiles les plus importantes sont celles qui sont localisées. La Figure 108 montre un exemple d'une pulsation ou groupe d'ondes localisées, ainsi que sa décomposition en ondes harmoniques. Les groupes d'ondes sont très utilisés dans la communication orale et dans les signaux de communication.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

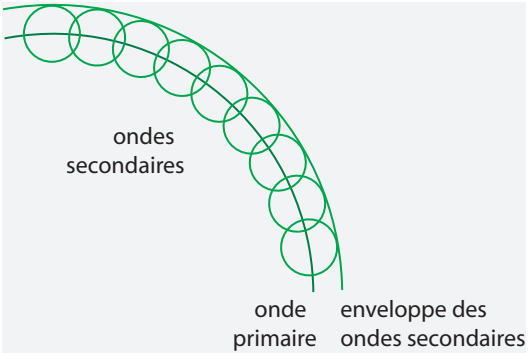


FIGURE 111 Propagation d'onde comme une conséquence du principe de Huygens.

Pourquoi pouvons-nous nous parler ? – Le principe de Huygens

Les propriétés de notre environnement ne révèlent souvent toute leur importance que lorsque nous posons des questions simples. Pourquoi pouvons-nous utiliser la radio ? Pourquoi pouvons-nous parler dans des téléphones portables ? Pourquoi pouvons-nous nous écouter les uns les autres ? Il apparaît qu'une partie cruciale de la réponse à ces questions est que l'espace dans lequel nous vivons possède un nombre *impair* de dimensions.

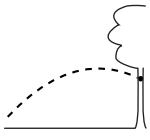
Dans les espaces de dimension *paire*, il est impossible de parler, parce que les paroles ne s'arrêtent jamais. C'est un résultat primordial qui est facilement vérifié en lançant une pierre dans un lac : même après que la pierre a disparu, des vagues sont toujours émises depuis l'emplacement où elle a coulé, alors que lorsque nous nous arrêtons de parler, plus aucune onde n'est émise. Les ondes se comportent ainsi différemment en deux et trois dimensions.

En trois dimensions, il est possible de dire que la propagation d'une onde se produit de la manière suivante : chaque point sur un front d'onde (lumineux ou sonore) peut être considéré comme étant la source d'ondes secondaires, la surface qui est formée par l'enveloppe de toutes les ondes secondaires détermine la position future du front d'onde. L'idée est illustrée sur la Figure 111. Elle peut être utilisée pour décrire, sans l'aide des mathématiques, la propagation des ondes, leur réflexion, leur réfraction, et, par une généralisation due à Augustin Fresnel, leur diffraction. (Essayez !)

Défi 397 e

Cette idée fut d'abord proposée par Christiaan Huygens en 1678, d'où son appellation de *principe de Huygens*. Presque deux cents ans plus tard, Gustav Kirchoff montra que ce principe est une conséquence de l'équation d'onde en trois dimensions, et donc, dans le cas de la lumière, une conséquence des équations du champ de Maxwell.

Mais la description des fronts d'onde comme enveloppes d'ondes secondaires possède une restriction essentielle. Elle n'est pas correcte en deux dimensions (bien que la Figure 111 soit bidimensionnelle !). En particulier, elle ne s'applique pas aux vagues sur l'eau. La propagation des vagues *ne peut pas* être calculée de cette façon avec exactitude. (C'est possible uniquement si la situation est limitée à une onde d'une seule fréquence.) Il apparaît que, pour des vagues sur l'eau, les ondes secondaires ne dépendent pas seulement du front d'onde des ondes primaires, mais également de leur partie intérieure. La raison est qu'en deux dimensions (et tout autre nombre pair) des ondes de fréquences



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

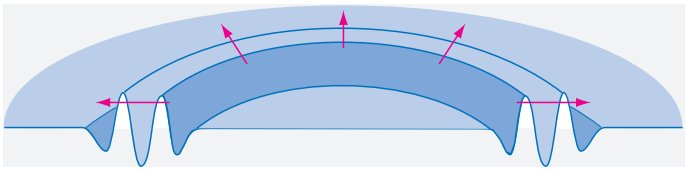


FIGURE 112 Une vague invraisemblable sur l'eau : le centre n'est jamais plat.

différentes possèdent nécessairement des vitesses différentes. Et une pierre chutant dans l'eau engendre des ondes ayant plusieurs fréquences. Au contraire, en trois dimensions (et tout autre nombre impair plus grand), des ondes de fréquences quelconques possèdent la même vitesse.

Nous pouvons également formuler que le principe de Huygens est cohérent si l'équation d'onde est résolue par une onde circulaire qui ne laisse aucune amplitude derrière elle. Les mathématiciens traduisent cela en exigeant que la fonction delta développée $\delta(c^2t^2 - r^2)$ vérifie l'équation d'onde, c'est-à-dire que $\partial_t^2\delta = c^2\Delta\delta$. La fonction delta est cette « fonction » étrange qui est nulle partout sauf à l'origine, où elle prend une valeur infinie. Quelques propriétés supplémentaires décrivent de manière précise comment tout cela se produit*. On montre que la fonction delta est une solution de l'équation d'onde seulement si l'espace est de dimension impaire et supérieure à trois. En d'autres termes, bien qu'une pulsation ondulatoire sphérique soit possible, une pulsation circulaire ne l'est pas : dans une onde en expansion, il n'existe aucune façon de maintenir le centre immobile (voir la Figure 112). C'est précisément ce que montre l'expérience de la pierre. Vous pouvez tenter de produire une pulsation circulaire (une onde qui ne possède que quelques crêtes) la prochaine fois que vous serez dans votre bain ou près d'un lac : vous n'y parviendrez pas.

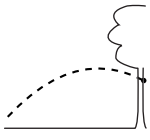
En résumé, la raison pour laquelle une pièce devient sombre dès que nous éteignons la lumière, est que nous vivons dans un espace doté d'un nombre de dimensions qui est impair et plus grand que un.

Signaux

Un signal représente le moyen de transport de l'information. Chaque signal est un mouvement d'énergie. Les signaux peuvent être soit des objets soit des ondes. Une pierre projetée peut être un signal, comme peut l'être un sifflement. Les ondes sont une forme plus commode de communication parce qu'elles n'exigent pas de transport de matière : il est plus aisé d'utiliser l'électricité dans un fil téléphonique pour transporter une parole que de commander un coursier. En réalité, la plupart des avancées technologiques modernes peuvent être retracées à partir du moment où il y a eu séparation entre le transport de matière et celui du signal. Au lieu d'acheminer un orchestre complet pour transmettre de la musique, nous pouvons envoyer des signaux radiophoniques. Au lieu d'expédier des lettres manuscrites, nous rédigeons des courriels. Au lieu de nous déplacer à la bibliothèque nous surfons sur Internet.

Les plus grands progrès dans la communication sont issus de l'utilisation des signaux

* La principale propriété est $\int \delta x dx = 1$. En termes mathématiques concis, la « fonction » delta est une distribution.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pour transporter de grandes quantités d'énergie. C'est ce que font les câbles électriques : ils acheminent de l'énergie sans transporter de quantité (perceptible) de matière. Nous n'avons pas nécessairement besoin de connecter nos appareils de cuisine directement à une centrale électrique : nous pouvons obtenir l'énergie par le biais de fils de cuivre.

Pour toutes ces raisons, le mot « signal » est fréquemment compris comme ayant uniquement rapport aux ondes. La voix, le son, les signaux électriques, les signaux radio et lumineux sont les exemples les plus courants de signaux ondulatoires.

Les signaux sont caractérisés par leur vitesse et leur contenu en information. Il apparaît que ces deux grandeurs sont limitées. La limitation de la vitesse est le point d'orgue
Page 15 de la théorie de la relativité restreinte.

Une limite élémentaire sur le contenu en information peut être formulée lorsque nous remarquons que le flux d'information est donné par la forme précise du signal. La forme est caractérisée par une fréquence (ou longueur d'onde) et une position en fonction du temps (ou espace). Pour chaque signal – et pour chaque onde – il existe une relation entre l'incertitude sur le temps d'arrivée Δt et l'incertitude sur la fréquence angulaire $\Delta\omega$:

$$\Delta t \, \Delta\omega \geqslant \frac{1}{2} \,. \tag{83}$$

Cette relation d'indétermination temps–fréquence exprime le fait que, dans un signal, il est impossible de spécifier à la fois l'instant d'arrivée et la fréquence avec une précision exacte. Les deux incertitudes sont (à un facteur numérique près) l'inverse l'une de l'autre. (Nous disons également que le produit du temps par la bande passante est toujours supérieur à $1/4\pi$.) Nous sommes confrontés à cette restriction parce que, d'une part, nous avons besoin d'une onde la plus proche possible d'une onde sinusoïdale pour déterminer précisément sa fréquence, mais que, d'autre part, nous avons besoin d'un signal le plus étroit possible pour déterminer avec exactitude son temps d'arrivée. La contradiction entre ces deux exigences conduit à cette limitation. La relation d'indétermination est donc une caractéristique intrinsèque de chaque phénomène ondulatoire. Vous pourriez vouloir examiner cette relation avec n'importe quelle onde dans votre
Défi 398 e environnement.

De manière équivalente, il existe une relation entre l'incertitude sur la position Δx et l'incertitude sur le vecteur d'onde $\Delta k = 2\pi/\Delta\lambda$ d'un signal :

$$\Delta x \, \Delta k \geqslant \frac{1}{2} \,. \tag{84}$$

Comme dans la situation précédente, cette relation d'indétermination exprime aussi qu'il est impossible de déterminer à la fois la position d'un signal et sa longueur d'onde avec une précision parfaite. Cette relation d'indétermination position–vecteur d'onde est également une particularité de n'importe quel phénomène ondulatoire.

Chaque relation d'incertitude est le corollaire de l'existence d'une minuscule entité. Dans le cas des ondes, cette entité la plus petite du phénomène est la période (ou le cycle, comme il est d'usage de l'appeler). À chaque fois qu'il y a une plus petite unité dans un phénomène naturel, une relation d'incertitude en découle. Nous rencontrerons d'autres relations d'indétermination à la fois en relativité et dans la théorie quantique. Comme

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

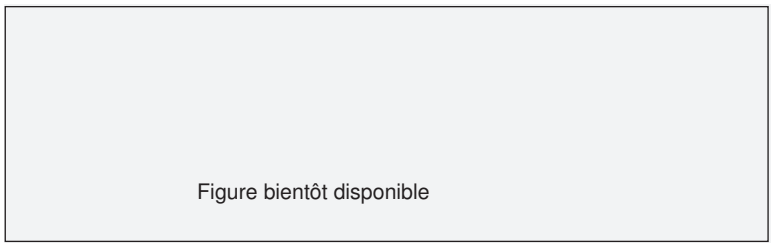


FIGURE 113 Signaux électriques mesurés dans un nerf.

nous le découvrirons, elles sont toujours dues à l'existence d'entités infimes.

Toutes les fois que des signaux sont émis, leur contenu peut être perdu. Chacune des six caractéristiques des ondes listées à la page 211 peut conduire à une dégradation de
Défi 399 pe l'information contenue. Pouvez-vous en fournir un exemple pour chaque cas ? L'énergie, la quantité de mouvement et toutes les autres propriétés conservées des signaux ne sont jamais perdues, bien entendu. L'atténuation des signaux est apparentée à la disparition du mouvement. Lorsque du mouvement disparaît par le frottement, il nous semble disparaître, alors qu'en réalité il est transformé en chaleur. Pareillement, quand un signal semble disparaître, il est en fait transformé en bruit. Le *bruit (physique)* est un rassemblement de nombreux signaux désordonnés, de la même manière que la chaleur est une collection de nombreux mouvements désordonnés.

Toute propagation du signal est décrite par une équation d'onde. Un exemple célèbre
Réf. 162 est l'équation découverte par Hodgkin et Huxley. C'est une approximation réaliste du comportement du potentiel électrique dans les nerfs. En utilisant les connaissances sur le comportement des ions potassium et sodium, ils élaborèrent une équation compliquée qui décrit l'évolution de la tension V dans les nerfs, et ainsi la façon dont les signaux sont propagés. Cette équation décrit de manière fiable les tensions de pointe caractéristiques mesurées dans les nerfs, et indiquées sur la Figure 113. Cette figure indique clairement que ces ondes diffèrent des ondes sinusoïdales : elles ne sont pas harmoniques. L'anharmonicité est une conséquence de la non-linéarité. Mais la non-linéarité peut provoquer des effets encore plus profonds.

Ondes solitaires et solitons

En août 1834, l'ingénieur écossais John Scott Russell (1808–1882) consigna une observation étrange relevée dans un canal fluvial, dans la campagne située aux alentours d'Édimbourg. Lorsqu'un bateau tiré à travers le canal était subitement arrêté, une onde bizarre sur l'eau s'éloignait de celui-ci. Elle était constituée d'*une seule* crête, longue d'environ 10 m et haute de 0,5 m, se déplaçant à 4 m/s environ. Il poursuivit cette crête, montrée dans la reconstitution de la Figure 114, sur plusieurs kilomètres avec son cheval : la vague disparut seulement très lentement. Russel n'avait pas observé de dispersion, comme pour les vagues classiques sur l'eau : la largeur de la crête demeurait constante. Russel commença alors à produire de telles ondes dans son laboratoire et étudia intensi-
Réf. 163 vement leurs propriétés. Il montra que la vitesse dépendait de l'amplitude, contrairement aux ondes harmoniques, linéaires. Il releva également que la profondeur d du canal était un paramètre déterminant. En fait, la vitesse v, l'amplitude A et la largeur L de ces ondes

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 114 Une onde solitaire sur l'eau suivie par un canot à moteur, reconstituant la découverte de Scott Russel. (© Dugald Duncan)

à crête unique sont reliées par

$$v = \sqrt{gd}\left(1 + \frac{A}{2d}\right) \quad \text{et} \quad L = \sqrt{\frac{4d^3}{3A}} \,. \tag{85}$$

Comme ces expressions l'indiquent, et comme Russel le notifia, les vagues hautes sont étroites et rapides, alors que les vagues superficielles sont lentes et larges. La forme des vagues est fixe durant leur déplacement. Aujourd'hui, celles-ci et toutes les autres vagues stationnaires dotées d'une seule crête sont appelées des *ondes solitaires*. Elles surgissent uniquement lorsque la dispersion et la non-linéarité du système se compensent exactement l'une l'autre. Russel remarqua aussi que les ondes solitaires produites dans des canaux fluviaux peuvent se traverser sans s'altérer, même quand elles voyagent dans des directions opposées ; les ondes solitaires qui possèdent cette propriété sont baptisées des *solitons*. Les solitons restent stables lorsqu'ils se rencontrent, comme indiqué sur la Figure 115, bien qu'en général les ondes solitaires ne le soient pas.

Ce n'est que soixante ans plus tard, en 1895, que Korteweg et de Vries s'aperçurent que des ondes solitaires produites dans des canaux possèdent une forme décrite par

$$u(x,t) = A \operatorname{sech}^2 \frac{x - vt}{L} \quad \text{où} \quad \operatorname{sech} x = \frac{2}{e^x + e^{-x}} \,, \tag{86}$$

(sech(x) représente la fonction *sécante hyperbolique* [N.D.T.]) et que la relation trouvée par Russel était due à l'équation d'onde

$$\frac{1}{\sqrt{gd}}\frac{\partial u}{\partial t} + (1 + \frac{3}{2d}u)\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{d^2}{6}\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \,. \tag{87}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

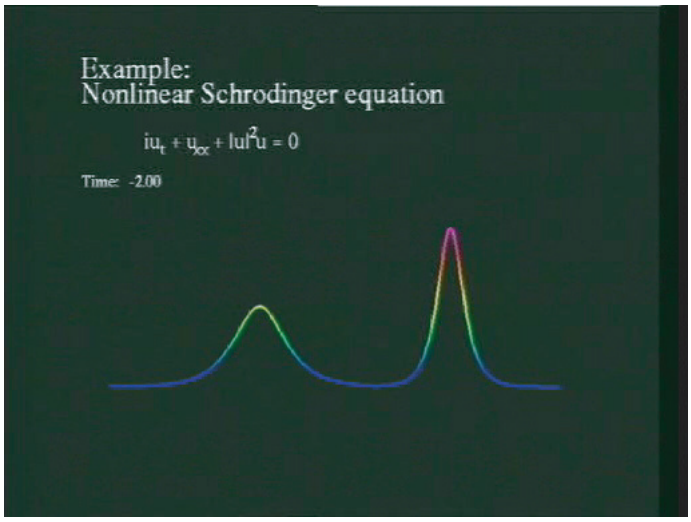


FIGURE 115 Les solitons restent stables lorsqu'ils se rencontrent. (© Jarmo Hietarinta)

Cette équation pour le développement de u est appelée *équation de Korteweg–de Vries* en leur honneur*. L'étonnante stabilité des solutions solitaires est due à l'effet antagoniste des deux termes qui distinguent cette équation des équations d'onde linéaires : pour les solutions solitaires, le terme non linéaire compense exactement la dispersion induite par le terme contenant la dérivée troisième.

Durant plusieurs décennies, de telles ondes solitaires ont été vues comme des curiosités mathématiques et physiques. Mais près d'une centaine d'années plus tard il devint clair que l'équation de Korteweg–de Vries est un modèle universel pour les ondes faiblement non linéaires dans le régime de faible dispersion, et ainsi d'importance primordiale. Cette conclusion fut révélée par Kruskal et Zabusky, qui démontrèrent mathématiquement en 1965 que les solutions (86) demeurent inchangées lors de collisions. Cette découverte les poussa à introduire le terme *soliton*. Ces solutions peuvent en réalité s'interpénétrer sans changement de vitesse ou de forme : une collision n'occasionne qu'un minuscule décalage de position pour chaque pulsation.

Réf. 164

Les ondes solitaires jouent un rôle dans de nombreux exemples d'écoulements fluides. On les rencontre dans les courants océaniques, et même la grande tache rouge de Jupiter, qui constitua une structure stable de son observation durant plusieurs siècles, en est un exemple.

Les ondes solitaires apparaissent également lorsqu'un son d'intensité extrêmement forte est produit dans des solides. Dans ces situations, elles peuvent conduire à la création de pulsations sonores de quelques nanomètres seulement de longueur. Les pulsations lumineuses solitaires sont aussi utilisées à l'intérieur de certaines fibres optiques de communication, où elles fournissent une transmission (presque) sans atténuation de signal.

Réf. 165

Réf. 163

* Cette équation peut être simplifiée en faisant un changement de variable pour u : plus précisément, elle peut être réécrite comme $u_t + u_{xxx} = 6uu_x$. Tant que les solutions sont des fonctions sech, celle-ci et d'autres versions remaniées de l'équation sont connues sous le même nom.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Vers la fin du vingtième siècle, une deuxième vague d'intérêt pour les mathématiques des solitons a ressurgi, lorsque les théoriciens quantiques s'intéressèrent à eux. La raison est simple mais profonde : un soliton est une « chose intermédiaire » située entre une particule et une onde, il possède à la fois les particularités de ces deux entités. Pour cette raison, les solitons constituent dorénavant une partie essentielle de toute description des particules élémentaires, comme nous le découvrirons un peu plus loin.

Curiosités et défis amusants sur les ondes et les corps étendus

> « La société est une vague. La vague se déplace vers l'avant, mais pas l'eau dont elle est constituée. »
>
> Ralph Waldo Emerson, *Self-Reliance*.

Quand la fréquence d'un son est doublée, nous disons que le son est plus haut d'une octave. Deux sons qui diffèrent d'une octave sont agréables à entendre, lorsqu'ils sont joués ensemble. Deux autres rapports harmonieux de fréquences – ou d'« intervalles », comme disent les musiciens – sont les quartes et les quintes. Quels sont les rapports
Défi 400 e correspondants des fréquences ? (Remarque : la réponse fut l'une des plus anciennes découvertes en physique, elle est attribuée à Pythagore, autour de 500 av. J.-C.)

* *

Un orchestre est en train de jouer de la musique dans une vaste salle. Quelqu'un écoute cette musique, à une distance de 30 m. Une autre personne écoute cette même musique
Défi 401 s avec un poste de radio, à une distance de 3 000 km. Qui entend la musique le premier ?

* *

Quelle est la période d'un pendule simple, c'est-à-dire d'une masse m attachée à une
Défi 402 pe ficelle sans masse de longueur l ? Quelle est cette période si la ficelle est beaucoup plus longue que le rayon de la Terre ?

* *

Quelle trajectoire est parcourue par un corps se déplaçant sur un plan, mais attaché par
Défi 403 s une ficelle à un point fixe de ce plan ?

* *

La *sirène* d'alarme est un appareil qui indique comment la rotation et l'oscillation sont re-
Défi 404 e liées entre elles. Découvrez comment elle fonctionne, et construisez-en une vous-même.

* *

La lumière est une onde, comme nous le découvrirons plus tard. Par conséquent, la lumière atteignant la Terre depuis l'espace est réfractée lorsqu'elle pénètre dans l'atmosphère. Pouvez-vous confirmer que, par conséquent, les étoiles apparaissent, dans une
Défi 405 e certaine mesure, plus hautes dans le ciel nocturne qu'elles ne le sont en réalité ?

* *

Quelles sont les plus hautes vagues océaniques ? Cette question n'a été systématiquement

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

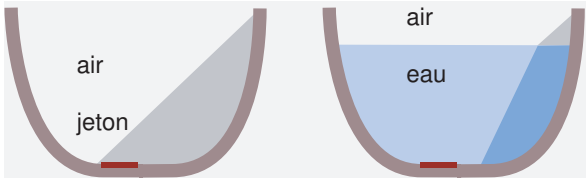


FIGURE 116 Ombres et réfraction.

Réf. 166 étudiée que très récemment, en utilisant des satellites. Le résultat époustouflant montre que des vagues en mer d'une hauteur de 25 m et plus sont *courantes* : il y a quelques vagues de cette sorte sur les océans à chaque instant donné. Ce résultat confirme les rares récits des capitaines de navire au long cours et explique de nombreux naufrages maritimes.

Les surfeurs doivent donc avoir beaucoup de chance pour surfer sur une vague de 30 m. (Le record est situé juste en dessous de cette hauteur.) Mais, probablement, les vagues les plus impressionnantes sur lesquels surfer sont celles de Pororoca, une série d'ondes de 4 m qui se déplacent de l'océan vers le fleuve Amazone chaque printemps, à contre-courant de l'écoulement du fleuve. Ces vagues peuvent être chevauchées sur une dizaine de kilomètres.

* *

Toutes les ondes sont, éventuellement, amorties. Cet effet est souvent dépendant de la fréquence. Pouvez-vous fournir une confirmation de cette dépendance dans le cas du
Défi 406 s son dans l'air ?

* *

Lorsque vous faites un trou avec une aiguille dans une feuille de papier noire, le trou peut
Défi 407 e être utilisé comme une lentille grossissante. (Essayez-le.) La diffraction est responsable de l'effet de lentille. D'ailleurs la diffraction de la lumière par des trous fut remarquée au dix-septième siècle par Francesco Grimaldi, qui en déduisit que la lumière est une onde. Ses observations furent discutées plus tard par Newton, qui les écarta ensuite à tort.

* *

Posez une tasse vide près d'une lampe, de telle façon que le fond de la tasse reste à l'ombre. Lorsque vous remplissez la tasse avec de l'eau, une partie du fond s'éclairera, à cause de la réfraction de la lumière provenant de la lampe. Le même effet nous permet de concevoir des lentilles. Cet effet est aussi à la base des instruments tels que les
Page ?? télescopes.

* *

Défi 408 s Les vagues sur l'eau sont-elles transverses ou longitudinales ?

* *

La vitesse des vagues sur l'eau restreint la vitesse des navires. Un bateau à la surface ne peut pas se déplacer (beaucoup) plus rapidement qu'environ $v_{\text{crit}} = \sqrt{0,16gl}$, où

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

$g = 9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$, l étant sa longueur, et 0,16 un nombre déterminé expérimentalement, appelé le nombre de Froude critique. Cette relation reste valide pour tous les navires et animaux, des énormes pétroliers ($l = 100\,\mathrm{m}$ qui donne $v_{\mathrm{crit}} = 13\,\mathrm{m/s}$) jusqu'aux canards ($l = 0{,}3\,\mathrm{m}$ qui donne $v_{\mathrm{crit}} = 0{,}7\,\mathrm{m/s}$). La vitesse critique est celle d'une vague de même longueur d'onde que celle du navire. En fait, se déplacer à des vitesses supérieures à la valeur critique est possible, mais nécessite nettement plus d'énergie. (Une vitesse supérieure est aussi possible si le navire surfe sur une vague.) Ainsi tous les animaux marins et les navires sont plus rapides lorsqu'ils se déplacent sous la surface – où la limite due aux ondes de surface n'existe pas – que lorsqu'ils nagent à la surface. Par exemple, les canards peuvent nager trois fois plus vite sous l'eau qu'à la surface.

Défi 409 s Le record de *natation olympique* est-il très éloigné de la valeur critique ?

* *

La vitesse de groupe des vagues (dans les eaux profondes) est inférieure à la vitesse des vagues prises individuellement. Par conséquent, lorsqu'un groupe de crêtes ondulatoires voyage, à l'intérieur du groupe les crêtes se déplacent de l'arrière vers l'avant, apparaissant à l'arrière, voyageant vers l'avant et s'éteignant au niveau du front avant.

* *

Nous pouvons entendre la mer au loin ou une autoroute lointaine beaucoup plus distinctement à la tombée de la nuit qu'au lever du jour. C'est un effet de la réfraction. La vitesse du son décroît avec la température. Le soir, le sol se rafraîchit plus rapidement que l'air situé au-dessus. Par conséquent, le son qui quitte le sol et qui voyage vers le haut est réfracté vers le bas, autorisant des distances d'écoute plus longues. Dans la matinée, l'air est généralement froid au-dessus et chaud en dessous. Le son est réfracté vers le haut, et les sons éloignés ne peuvent atteindre un auditeur situé au sol. La réfraction implique donc que les matinées sont silencieuses, et que nous pouvons entendre des sons plus éloignés au cours des soirées. Les éléphants tirent profit de ce phénomène sonore durant les soirées pour communiquer sur des distances de plus de 10 km. (Ils utilisent également les ondes sonores du sol pour communiquer, mais c'est une autre histoire.)

* *

La réfraction implique également qu'il existe un canal sonore dans l'océan, et dans l'atmosphère. La vitesse du son décroît avec la température, et augmente avec la pression. À une profondeur océanique de 1 km, ou à une hauteur atmosphérique de 13 à 17 km (c'est le point culminant atteint par les cumulonimbus, les nuages les plus élevés ou, de manière équivalente, c'est le milieu de la couche d'ozone), le son atteint sa vitesse minimale. En conséquence, le son qui est émis à cette distance et qui essaie de s'en écarter est canalisé vers celle-ci. Les baleines utilisent cette canalisation sonore pour communiquer avec leurs congénères grâce à des sons musicaux magnifiques ; nous pouvons trouver
Défi 410 e des enregistrements de ces chants sur Internet. L'armée utilise avec succès des microphones placés au niveau du canal sonore de l'océan pour localiser les sous–marins, et des microphones sur des aérostats situés dans le canal atmosphérique pour épier les ex-
Réf. 167 plosions nucléaires. (En réalité, les expériences sonores dirigées par l'armée restent la cause principale d'échouage des baleines, qui sont assourdies et perdent leur orientation. Des expériences similaires dans l'air avec des ballons de haute altitude sont fréquemment

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

confondues avec des soucoupes volantes, comme lors de la célèbre affaire Roswell.)

* *

Réf. 168 Des animaux beaucoup plus petits communiquent également par les ondes sonores. En 2003, il fut découvert que les harengs communiquent en utilisant des bruits qu'ils produisent lorsqu'ils pètent. Lorsque le gaz s'échappe, il produit un tic-tac dont le spectre de fréquence atteint jusqu'à 20 kHz. Nous pouvons même entendre des enregistrements de ce son sur Internet. Les détails de cette communication, comme les différences entre les mâles et les femelles, sont toujours en cours d'étude. Il est possible que ces sons doivent également être utilisés par des prédateurs pour détecter les harengs saurs, et ils pourraient même être utilisés par de futurs bateaux de pêche.

* *

Sur les mers balayées par les vents, les crêtes blanches des vagues induisent plusieurs effets importants. Le bruit provient de minuscules bulles d'eau explosant et implosant. Le bruit des vagues au large est donc la superposition de nombreuses petites explosions. En même temps, les crêtes blanches représentent les lieux où les mers absorbent le gaz carbonique de l'atmosphère, et ainsi elles réduisent le réchauffement global de la planète.

* *

Pourquoi y a-t-il de nombreux petits trous dans les plafonds des bureaux d'un grand
Défi 411 s nombre d'entreprises ?

* *

Quelle quantité détermine la longueur d'onde des vagues émises lorsqu'une pierre est
Défi 412 pe jetée dans un étang ?

* *

Réf. 3 Yakov Perelman cite les quatre problèmes suivants dans son ravissant recueil de problèmes physiques.

(1) Une pierre tombant dans un lac produit des vagues circulaires. Quelle est la forme des vagues produites par une pierre chutant dans une rivière, où l'eau s'écoule dans une
Défi 413 s certaine direction ?

(2) Il est possible de construire une lentille pour le son, de la même manière qu'il est
Défi 414 s possible d'en construire une pour la lumière. À quoi une telle lentille ressemblerait-elle ?
Défi 415 pe (3) Quel est le son que l'on entend à l'intérieur des coquillages ?

(4) La lumière prend environ huit minutes pour voyager du Soleil à la Terre. Quelle
Défi 416 s conséquence cela a-t-il pour un lever du soleil ?

* *

Pouvez-vous décrire comment un Rubik's Cube est conçu ? Et ses généralisations à des
Défi 417 s nombres plus élevés de segments ? Y a-t-il une limite au nombre de segments possibles ? Ces énigmes sont encore plus tenaces que la quête du réarrangement du cube. Des casse-tête identiques peuvent être relevés dans l'étude de nombreux mécanismes, depuis les robots jusqu'aux machines textiles.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Le son produit typiquement une variation de pression de 10^{-8} bar dans l'oreille. Comment est-elle déterminée ?

Défi 418 pe

L'oreille est en fait un dispositif sensible. Il est maintenant établi que la plupart des cas de mammifères marins, comme les baleines, dérivant vers le rivage sont dus à des problèmes auditifs : certains dispositifs militaires (soit des signaux sonar soit des explosions) ont généralement détruit leur oreille de telle façon qu'ils deviennent sourds et perdent l'orientation.

* *

Les *infrasons*, sons inaudibles situés en dessous de 20 Hz, constituent un récent domaine de recherche. Dans la nature, les infrasons sont émis par les séismes, les éruptions volcaniques, le vent, le tonnerre, les chutes d'eau, les météorites en chute et les vagues déferlantes. Le mouvement des glaciers, les tremblements de terre sous-marins, les avalanches et les orages géomagnétiques émettent également des infrasons. Les sources anthropiques sont représentées par les lancements de missiles, le trafic automobile, les moteurs à essence et les compresseurs d'air.

Réf. 169

Il est avéré que des infrasons de haute intensité peuvent provoquer des vomissements ou des perturbations du sens de l'équilibre (140 dB ou plus pendant 2 minutes), et même la mort (170 dB pendant 10 minutes). Les effets d'intensités plus basses sur la santé humaine ne sont pas encore connus.

L'infrason peut effectuer plusieurs fois le tour du monde avant de s'éteindre, comme l'explosion volcanique du Krakatoa le montra en 1883. Grâce aux détecteurs infrasonores modernes, les vagues déferlantes marines peuvent être détectées à des centaines de kilomètres de distance. Les vagues déferlantes engendrent un « fredonnement » permanent de la croûte terrestre à des fréquences comprises entre 3 et 7 mHz. Le *réseau global d'infrason* du SSI utilise les infrasons pour détecter les tests d'armes nucléaires, les séismes et les éruptions volcaniques, et peut comptabiliser les météorites. Les météorites ne sont que très rarement audibles à l'oreille humaine.

* *

La méthode utilisée pour mettre en évidence les ondes sinusoïdales contenues dans un signal, comme indiqué sur la Figure 108, est appelée transformée de Fourier. Elle est prépondérante dans toutes les sciences et dans la technologie. Dans les années 1980, une généralisation intéressante se popularisa, dénommée la *transformée en ondelettes*. Au contraire de la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes nous permet de localiser des signaux en fonction du temps. Des transformées en ondelettes sont utilisées pour comprimer efficacement des images numériques, pour diagnostiquer des problèmes de turbine d'avion, et dans de nombreuses autres applications.

Réf. 170

* *

Si vous aimez les challenges d'ingénieurs, en voici un qui est toujours ouvert. Comment pouvons-nous concevoir un système robuste et efficace qui puisse transformer l'énergie des vagues en électricité ?

Défi 419 r

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Si vous êtes intéressé par les vagues océaniques, vous devriez également être fasciné par la science de l'*océanographie*. Pour une introduction, consultez les manuels en libre accès sur http://oceanworld.tamu.edu/.

* *

Dans notre description des corps étendus, nous avons supposé que chaque point d'un corps peut être analysé séparément tout au long de son mouvement. Cette hypothèse est-elle justifiée ? Que se passerait-il si ce n'était pas le cas ? Défi 420 r

* *

Une espèce particulière d'ondes apparaît dans les explosions et les vols supersoniques : les *ondes de choc*. Dans une onde de choc, la densité de la pression d'un gaz varie brutalement, sur des distances de l'ordre de quelques micromètres. L'étude des ondes de choc est un domaine de recherches à part entière, les ondes de choc déterminent le trajet aérien des projectiles, le claquement des fouets et les effets des détonations.

* *

Les chauves-souris volent la nuit en utilisant l'*écholocation**. Les dauphins l'utilisent également. Le sonar, utilisé par les navires de pêche pour détecter les bancs de poissons, reproduit le système des dauphins. Il est beaucoup moins connu que les humains possèdent la même aptitude. Avez-vous déjà essayé d'écholocaliser un mur dans une pièce complètement sombre ? Vous serez surpris de constater comment cela est facilement réalisable. Produisez simplement un sifflement criard ou un bruit sifflotant qui s'arrête brutalement, puis écoutez l'écho. Vous serez alors capable de localiser les murs de manière fiable. Réf. 171 Défi 421 e

* *

Les oiseaux chantent. Si vous désirez explorer comment ce phénomène se réalise, regardez le film en rayons X trouvé sur le site Web http://www.indiana.edu/~songbird/multi/cineradiography_index.html.

* *

Chaque soliton est une structure unidimensionnelle. Les analogues bidimensionnels existent-ils ? Ce problème demeura ouvert durant de nombreuses années. Finalement, en 1988, Boiti, Leon, Martina et Fumagalli remarquèrent qu'une certaine équation d'évolution, l'équation de Davey–Stewartson, pouvait avoir des solutions qui sont localisées en deux dimensions. Ces résultats furent généralisés par Fokas et Santini et plus encore par Hietarinta et Hirota. Une telle solution est appelée aujourd'hui un *dromion*. Les dromions sont des protubérances qui sont localisées en deux dimensions et qui peuvent se déplacer sans disparaître tout au long de la diffusion, dans des systèmes non linéaires. Un exemple est indiqué sur la Figure 117. Toutefois, jusqu'à présent, aucune solution de ce genre n'a été observée dans les expériences, ce qui constitue l'un des plus importants défis expérimentaux toujours ouverts en science non linéaire. Réf. 172

* Elles utilisent l'écho renvoyé par des cris (des salves d'ultrasons de fréquence $f = 60\,\mathrm{kHz}$) qu'elles émettent pour se repérer [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

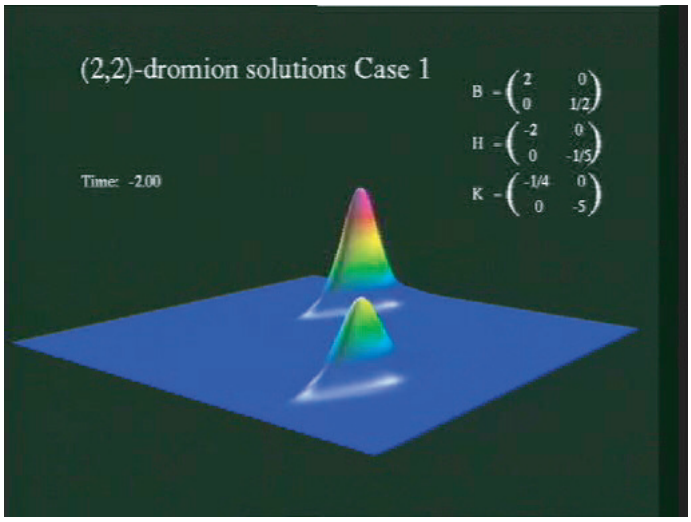
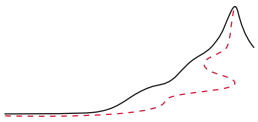


FIGURE 117 Simulation du mouvement d'un dromion à travers un milieu bidimensionnel. (© Jarmo Hietarinta)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 11

LES CORPS ÉTENDUS EXISTENT-ILS ? – LES LIMITES DE LA CONTINUITÉ

Nous venons de discuter du mouvement des corps étendus de manière assez détaillée. Nous avons vu que les corps étendus dénotent un mouvement ondulatoire. Mais les corps étendus existent-ils dans la nature ? Assez étrangement, cette interrogation a été l'une des questions les plus intensément débattues en physique. Au cours des siècles, elle est réapparue de nombreuses fois et, à chaque amélioration de la description du mouvement, la réponse a alterné entre l'affirmatif et le négatif. Un grand nombre d'intellectuels ont été mis en prison et de nombreux autres sont toujours persécutés pour avoir donné des réponses qui ne sont pas politiquement correctes ! En réalité, ce problème se révèle déjà dans la vie quotidienne.

Montagnes et fractales

À chaque fois que nous escaladons une montagne, nous suivons le contour de sa forme. Nous décrivons généralement ce contour par une surface courbée bidimensionnelle. Dans la vie courante nous remarquons que c'est une bonne approximation. Mais il existe des alternatives. La plus populaire est l'idée que les montagnes sont des surfaces fractales. Une *fractale* fut définie par Benoît Mandelbrot comme un ensemble qui est auto-similaire sous une quantité dénombrable mais infinie de valeurs d'agrandissements*. Nous avons déjà rencontré les lignes fractales. Un exemple d'algorithme pour construire une *surface* fractale (aléatoire) est montré sur le côté droit de la Figure 118. Il produit des formes qui ressemblent remarquablement aux véritables montagnes. Les résultats sont si réalistes qu'ils sont utilisés dans les productions d'Hollywood. Si cette description était correcte, les montagnes seraient étendues, mais pas continues.

Page 44

Réf. 173

Mais les montagnes pourraient également être des fractales d'un type différent, comme indiqué dans la partie gauche de la Figure 118. Les surfaces montagneuses pourraient avoir une infinité de petits trous et d'autres plus petits encore. En fait, nous pourrions aussi imaginer que les montagnes sont décrites comme des versions tridimensionnelles de la partie gauche de la figure. Les montagnes seraient alors une espèce de gruyère mathématique. Pouvez-vous inventer une expérience afin de décider si les fractales fournissent la description correcte pour modéliser les montagnes ? Pour appréhender ce problème, aidons-nous d'une barre de chocolat.

Défi 422 s

* Pour une définition de l'indénombrabilité, allez à la page **??**.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

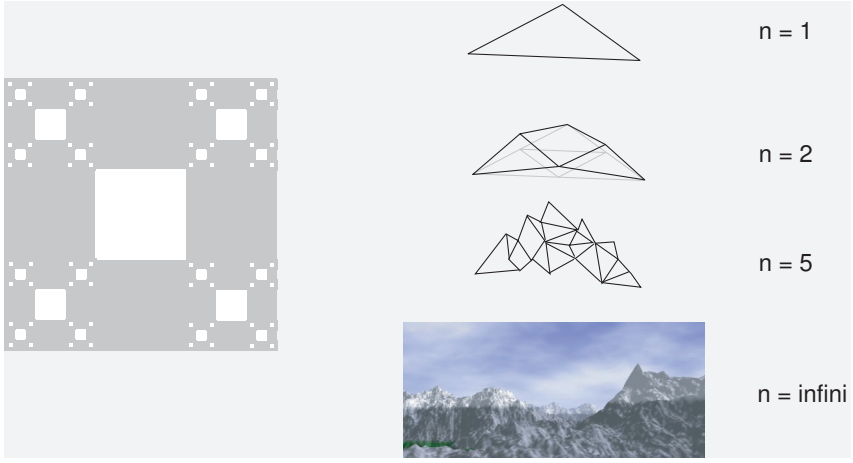


FIGURE 118 Des paysages et des montagnes vus comme des fractales. (photographie © Paul Martz)

Une barre de chocolat peut-elle durer pour toujours ?

> « D'une goutte d'eau un logicien pourrait prévoir
> un océan Atlantique ou un Niagara. »
> Arthur Conan Doyle, *A Study in Scarlet*

Tout enfant sait comment faire durer une barre de chocolat pour toujours : il mange la moitié de ce qu'il reste chaque jour. Cependant, cette astuce ne fonctionne que si la matière est un invariant d'échelle. En d'autres mots, la méthode ne fonctionne que si la matière est soit *fractale*, car elle serait alors invariante d'échelle pour un ensemble discret de facteurs de zoom, soit *continue*, auquel cas elle serait invariante d'échelle pour n'importe quel facteur de zoom. Quelle réponse, s'il y en a une, s'applique à la nature ?

Page 43

Nous avons déjà rencontré un fait qui assimilait la continuité à une hypothèse contestable : la continuité nous permettrait, comme Banach et Tarski l'ont montré, de démultiplier la nourriture et n'importe quelle matière par un découpage et un réassemblage astucieux. La continuité permettrait aux enfants de déguster la *même* quantité de chocolat chaque jour, sans jamais acheter une nouvelle barre. La matière n'est donc pas continue. Maintenant, le chocolat fractal n'est pas évincé par cette déduction, mais d'autres expériences examinent cette question. En réalité, nous remarquons que les matériaux fondus n'occupent pas des volumes beaucoup plus petits que les mêmes à l'état solide. Nous découvrons aussi que les matériaux ne rétrécissent pas, même sous les pressions les plus élevées. Donc la matière n'est pas fractale. Quelle est alors sa structure ?

Pour avoir une idée de la structure de la matière, nous pouvons considérer du chocolat fluide ou même uniquement de l'huile – qui reste malgré tout l'ingrédient principal du chocolat – et l'étaler sur une grande surface. Par exemple, nous pouvons étaler une goutte d'huile sur une mare lors d'une journée sans pluie ou sans vent ; il n'est pas difficile d'observer quelles parties de l'eau sont couvertes par l'huile et lesquelles ne le sont pas. Une petite gouttelette d'huile ne peut pas recouvrir une surface plus grande que... pouvez-vous deviner cette valeur ? Essayer d'étaler ce mince film plus loin conduira inévitablement à sa déchirure en morceaux. La méthode des enfants pour prolonger le plaisir du chocolat ne fonctionne donc pas pour toujours : elle prend soudainement fin un

Défi 423 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

jour. L'expérience de l'huile montre qu'il existe une épaisseur *minimale* pour les films d'huile, d'une valeur d'environ 2 nm. Cette simple expérience peut même être réalisée à la maison, elle indique qu'il y a une taille minimale dans la matière. La matière est faite de minuscules constituants. Cela confirme les observations réalisées par Joseph Loschmidt* en 1865, qui fut le premier à mesurer la taille des constituants de la matière**. En 1865, ce n'était pas une surprise d'apprendre que la matière était faite de petits éléments, puisque l'existence d'une taille la plus petite – mais pas sa valeur – avait déjà été déduite par Galilée, lorsqu'il étudiait quelques questions simples mais différentes***.

* Joseph Loschmidt (n. Pocerny 1821, d. Vienne 1895) était un physicien et chimiste autrichien. L'expérience de l'huile fut popularisée quelques décennies plus tard, par Kelvin. Il est souvent affirmé que Benjamin Franklin fut le premier à diriger l'expérience de l'huile, c'est faux. Franklin ne mesura pas l'épaisseur, et ne considéra même pas cette question. Il avait versé de l'huile sur l'eau, mais manqua la conclusion la plus importante qui pouvait se dessiner à partir de cela. Mêmes les génies ne découvrent pas tout.

** Loschmidt savait que la viscosité (dynamique) d'un gaz était donnée par $\eta = \rho l v/3$, où ρ représente la densité du gaz, v la vitesse moyenne des constituants et l leur libre parcours moyen. À l'aide de la prédiction d'Avogadro (faite en 1811 sans préciser aucune valeur) qu'un volume V de n'importe quel gaz contient toujours le même nombre N de constituants, nous obtenons également $l = V/\sqrt{2\pi N\sigma^2}$, où σ représente la section efficace des constituants. (La section efficace est la surface fictive que devrait avoir une particule cible pour reproduire la probabilité observée de collision ou de réaction avec une autre particule en supposant que ces collisions se produisent entre des objets matériels impénétrables [N.D.T.].) Loschmidt présuma alors que, lorsque le gaz est liquéfié, le volume du liquide est la somme des volumes des particules. Il mesura donc toutes les quantités concernées et détermina N. La valeur contemporaine de N, appelé le *nombre d'Avogadro* ou *nombre de Loschmidt*, est de $6,02 \cdot 10^{23}$ particules pour 22,4 l de n'importe quel gaz dans des conditions normales de pression et de température (aujourd'hui appelé 1 mol).

*** Galilée fut assigné en justice à cause de ses idées concernant les atomes et non à propos du mouvement de la Terre, comme il est souvent entendu. Pour avoir une idée précise des objets de la controverse dans le cas de Galilée, particulièrement ceux qui intéressent les physiciens, le meilleur texte est l'excellent livre de Pietro Redondi, *Galileo eretico*, Einaudi, 1983, traduit en anglais dans *Galileo Heretic*, Princeton University Press, 1987. Il est également disponible dans de nombreuses autres langues. Redondi, qui est un illustre historien des sciences et confrère de Pierre Costabel, raconte l'histoire de la querelle entre Galilée et les instances réactionnaires de l'Église catholique. Il découvrit un document de cette époque – la dénonciation anonyme qui donna naissance au procès – qui lui permit de montrer que la condamnation de Galilée à une détention à perpétuité pour ses idées sur le mouvement de la Terre était montée de toutes pièces par son ami le pape pour le *protéger* d'une condamnation à mort inévitable par rapport à un sujet différent.

Les raisons de son arrestation, qui furent formulées par la dénonciation, n'étaient pas relatives à ses idées sur l'astronomie et sur le mouvement de la Terre, mais à ses affirmations concernant la matière. Galilée défendit l'idée que, puisque la matière n'est pas invariante d'échelle, elle doit être constituée d'« atomes » ou, comme il les nommait, de *piccolissimi quanti* – les plus petits quanta. C'était et cela reste toujours une hérésie. Un véritable catholique n'est toujours pas autorisé à croire aux atomes. En réalité, la théorie des atomes n'est pas compatible avec la transformation du pain et du vin en chair et sang humains, dénommée *transsubstantiation*, qui constitue un principe central de la foi catholique. À l'époque de Galilée, les tribunaux inquisitoires punissaient l'hérésie, c'est-à-dire les opinions personnelles divergentes, par la peine de mort. Malgré qu'il fût condamné à la prison lors de son procès, Galilée publia son dernier livre, rédigé par un vieil homme en état d'arrestation, sur le problème de la variation d'échelle. Aujourd'hui, l'Église catholique refuse toujours de publier les actes et d'autres documents relatifs à ce procès. Ses dignitaires évitent prudemment le thème des atomes, et n'importe quelle parole sur ce sujet exposerait l'Église catholique à la dérision. En fait, la théorie quantique, nommée d'après l'expression utilisée par Galilée, est devenue aujourd'hui la description la plus précise de la nature.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

À QUELLE HAUTEUR LES ANIMAUX PEUVENT-ILS SAUTER ?

Les puces peuvent sauter à des hauteurs équivalentes à une centaine de fois leur taille, les hommes à des hauteurs d'environ leur propre taille seulement. En fait, les études biologiques rapportent une observation simple : la plupart des animaux, en laissant de côté leur taille, atteignent à peu près la même hauteur de saut comprise entre 0,8 et 2,2 m, qu'ils soient des humains, des chats, des sauterelles, des singes, des chevaux ou des panthères. L'explication de cette réalité ne prend que deux lignes. Pouvez-vous la découvrir ?

Réf. 174

Défi 424 s

L'observation ci-dessus semble être un exemple d'invariance d'échelle. Mais il y a quelques exceptions intéressantes aux deux extrémités de l'échelle des masses. À l'échelle des petites masses, les acariens et autres petits arthropodes n'atteignent pas de telles hauteurs parce que, comme tous les petits objets, ils rencontrent le problème de la résistance de l'air. Du côté des grandes masses, les éléphants ne sautent pas aussi haut, parce que cela briserait leur squelette. Mais finalement pourquoi les os se brisent-ils ?

Pourquoi tous les hommes sont-ils à peu près de la même taille ? Pourquoi n'y a-t-il pas d'adultes géants d'une hauteur de dix mètres ? Pourquoi n'existe-t-il pas un quelconque animal terrestre plus grand que les éléphants ? La réponse fournit la clé de la compréhension de la structure de la matière. En fait, les matériaux dont nous sommes constitués ne permettraient pas de telles variations d'échelle, puisque les os des géants s'effondreraient sous le poids qu'ils auraient à supporter. Les os possèdent une force limitée parce que leurs composants sont collés les uns aux autres avec une attraction limitée. La matière continue – qui n'existe que dans les dessins animés – ne pourrait nullement se briser, et la matière fractale serait infiniment fragile. La matière cède sous une charge finie parce qu'elle est composée de tous petits constituants élémentaires.

ÉLAGAGE D'ARBRES

Les délicates pentes inférieures de la Montagne Mouvement sont recouvertes d'arbres. Les arbres sont des structures passionnantes. Prenez leur stature. Pourquoi les arbres ont-ils une taille finie ? Déjà au seizième siècle, Galilée savait qu'il n'est pas possible d'augmenter la hauteur d'un arbre jusqu'à l'infini : à un certain point, un arbre n'aurait pas la vigueur nécessaire pour supporter son propre poids. Il estima la hauteur maximale à environ 90 m ; le record actuel, inconnu à son époque, semble être de 150 m, détenu par l'arbre australien *Eucalyptus regnans*. Mais après tout pourquoi y a-t-il une limite ? La réponse est la même que pour les os : le bois possède une force limitée parce qu'il n'est pas invariant d'échelle, et il n'est pas invariant d'échelle parce qu'il est composé de petits constituants, à savoir des atomes*.

En réalité, le calcul de la valeur précise de la hauteur limite est plus compliqué. Les arbres ne doivent pas se briser lors de violentes tempêtes. La résistance au vent limite le rapport hauteur sur épaisseur h/d à environ 50 pour des arbres de taille normale (pour $0{,}2\,\mathrm{m} < d < 2\,\mathrm{m}$). Pouvez-vous dire pourquoi ? Des arbres plus fins sont limités en hauteur à moins de 10 m par l'exigence qu'ils doivent regagner leur position verticale après avoir été courbés par le vent.

Défi 425 pe

Réf. 176

De telles études sur les contraintes naturelles répondent aussi à la question de savoir

Réf. 175

* Il existe un autre facteur limitant important : les colonnes d'eau à l'intérieur des arbres ne doivent pas céder. Ces deux facteurs semblent donner des hauteurs limites identiques.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

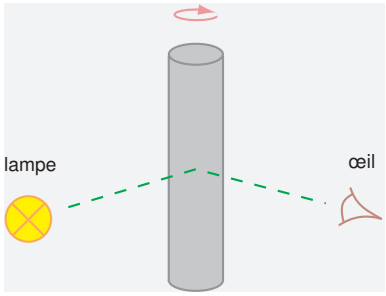


FIGURE 119 Les atomes existent : la rotation d'un rouleau d'aluminium provoque des oscillations de luminosité.

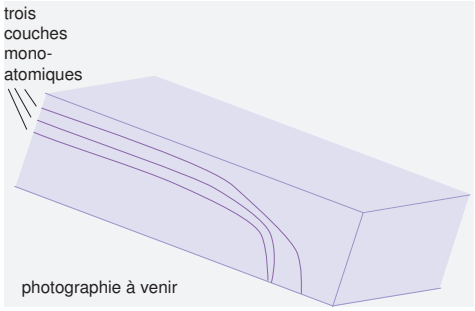


FIGURE 120 Des niveaux atomiques situés dans des cristaux d'arséniure de gallium brisés peuvent être observés sous un microscope optique.

pourquoi les arbres sont faits de bois et non pas, par exemple, d'acier. Vous pourriez vérifier par vous-même que la hauteur maximale d'un pilier d'une masse donnée est déterminée par le rapport E/ρ^2 entre le module d'élasticité et le carré de la masse volumique. Le bois est en fait le matériau pour lequel ce rapport est le plus élevé. Les spécialistes des matériaux sont parvenus, tout récemment, à obtenir des rapports légèrement meilleurs avec des matériaux composites en fibre.

Défi 426 s

Réf. 177

Mais après tout, pourquoi les matériaux se brisent-ils ? Toutes les observations fournissent la même réponse et confirment le raisonnement de Galilée : parce qu'il existe a une taille minimale dans les matériaux. Par exemple, des corps sous contrainte sont déchirés à l'emplacement où leur résistance est minimale. Si un corps était complètement homogène, il ne pourrait pas être déchiré, une fêlure ne pourrait être amorcée nulle part. Si un corps avait une structure en gruyère fractal, les fêlures pourraient démarrer à des emplacements multiples et un choc infinitésimal suffirait alors à les produire.

Une expérience simple qui indique que les solides possèdent une taille minimale est montrée dans la Figure 119. Un rouleau cylindrique d'un unique cristal d'aluminium pur révèle un comportement surprenant lorsqu'il est éclairé de côté : sa luminosité dépend de la manière dont le rouleau est orienté, bien qu'il soit parfaitement circulaire. Cette dépendance angulaire est due à l'agencement des atomes d'aluminium dans le rouleau.

Il n'est pas difficile de confirmer expérimentalement l'existence d'une dimension minimale dans les solides. Cette dernière est suffisante pour briser un unique cristal, comme une galette d'arséniure de gallium, en deux. La surface de rupture soit est parfaitement plate, soit montre des niveaux extrêmement fins, comme indiqué sur la Figure 120. Ces paliers sont visibles avec un microscope optique ordinaire. (Pourquoi ?) Il apparaît que toutes les hauteurs des paliers sont des multiples d'une taille minimale : sa valeur est d'environ 0,2 nm. L'existence d'une dimension minimale, correspondant à la hauteur d'un atome, bannit toute opportunité d'invariance d'échelle dans la matière.

Défi 427 pe

L'ÉCHO DU SILENCE

Après avoir escaladé les pentes de la Montagne Mouvement, nous arrivons dans une région où la forêt est recouverte d'une neige profonde. Nous nous arrêtons un instant et

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

observons autour de nous. Il fait sombre, tous les animaux sont endormis, il n'y a pas de vent et aucun bruit ne se fait entendre. Nous nous immobilisons, sans respirer, et écoutons le silence. (Vous pouvez également reproduire cette expérience dans un studio tel que ceux utilisés pour les enregistrements musicaux, ou dans une chambre paisible en pleine nuit.) Dans les situations de silence parfait, l'oreille devient automatiquement plus sensible*, nous ressentons alors une étrange sensation. Nous entendons deux bourdonnements : un bruit faiblement aigu et un autre fortement aigu, qui sont manifestement provoqués à l'intérieur de l'oreille. Les expériences indiquent que la note la plus élevée est due à l'activité des cellules ciliées dans l'oreille interne. La note la plus basse est due à la pulsation sanguine qui traverse la tête. Mais finalement pourquoi entendons-nous un bruit ?

De nombreuses expériences similaires confirment que, quoi que nous fassions, nous ne pouvons jamais éliminer le bruit dans les mesures. Ce type inéluctable de bruit est appelé *bruit de grenaille* en physique. Les propriétés statistiques de ce type de bruit correspondent effectivement précisément à ce qui serait attendu si les écoulements, au lieu d'être des mouvements continus de matière, étaient des transports d'un grand nombre d'entités identiques, petites et discrètes. Ainsi, le simple fait d'écouter le bruit démontre que le courant électrique est constitué d'électrons, que l'air et les liquides sont faits de molécules, et que la lumière se compose de photons. Dans un sens, l'écho du silence représente le son des atomes. Le bruit de grenaille n'existerait pas dans les systèmes continus.

Des petites billes dures

> « Je préfère comprendre la cause d'un phénomène élémentaire qu'être le roi de Perse. »
> Démocrite

Des observations précises montrent que la matière n'est ni continue ni fractale : la matière est constituée de particules fondamentales élémentaires. Galilée, qui déduisit leur existence en pensant aux géants et aux arbres, les appela « les plus petits quanta ». Aujourd'hui ils sont appelés « atomes », en l'honneur d'une discussion célèbre qui eut lieu dans la Grèce antique. En réalité, il y a 2 500 ans, les Grecs se posèrent la question suivante : si le mouvement et la matière sont conservés, comment le changement et la transformation peuvent-ils exister ? L'école philosophique de Leucippe et Démocrite d'Abdère**

* L'oreille humaine peut détecter des variations de pression d'au moins 20 µPa.

** Leucippe d'Élée (Λευκιππος) (v. 490 à v. 430 av. J.-C.) fut un philosophe grec. Élée était une petite ville située au sud de Naples. Elle se trouve en Italie, mais appartenait à l'époque à la Grande Grèce. Démocrite (Δεμοκριτος) d'Abdère (v. 460 à v. 356 ou 370 av. J.-C.), également philosophe grec, fut indubitablement le plus grand philosophe qui ait jamais vécu. En même temps que son maître Leucippe, il fut le fondateur de la théorie atomiste. Démocrite était un penseur fort admiré, et un contemporain de Socrate. Le vaniteux Platon ne mentionna jamais son nom, puisqu'il représentait un danger pour sa propre renommée. Démocrite écrivit de nombreux ouvrages qui ont tous été perdus, ils ne furent pas recopiés pendant le Moyen Âge à cause de leur point de vue scientifique et rationnel sur le monde, qui était considéré comme blasphématoire par les fanatiques religieux qui avaient le monopole sur l'industrie de la recopie des manuscrits. De nos jours, il est devenu courant de revendiquer – de façon incorrecte – que Démocrite ne possédait aucune preuve de l'existence des atomes. C'est un exemple caractéristique de désinformation couplée à la sombre intention de se sentir supérieur aux Anciens.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

effectuèrent deux observations particulières avec beaucoup de soins. Ils remarquèrent que le sel se dissout dans l'eau. Ils remarquèrent également qu'un poisson peut nager dans l'eau. Dans le premier cas, le volume d'eau n'augmente pas quand le sel est dissous. Dans le second cas, lorsque le poisson avance, il doit pousser de l'eau vers les côtés. Leucippe et Démocrite déduisirent qu'il existe une seule explication possible qui puisse vérifier ces observations et qui réconcilie également conservation et transformation : la nature est faite de vide et de minuscules particules indivisibles et conservées*. De cette manière n'importe quel exemple de mouvement, de changement ou de transformation est dû à des réorganisations de ces particules, le changement et la conservation sont donc réconciliés.

En résumé, puisque la matière est dure, possède une forme et est divisible, Leucippe et Démocrite l'imaginèrent comme étant constituée d'atomes. Les atomes sont des particules qui sont dures, ont une forme, mais sont indivisibles. En d'autres termes, les Grecs se figurèrent la nature comme un vaste jeu de Lego. Les pièces de Lego sont en tout premier lieu dures ou *impénétrables*, c'est-à-dire répulsives à des distances extrêmement petites. Elles sont *attractives* à petite distance : elles restent collées ensemble. Finalement, elles ne dénotent *aucune interaction* à grande distance. Les atomes se comportent de la même manière. (En réalité, ce que les Grecs appelèrent « atomes » correspondait en partie à ce que nous appelons aujourd'hui des « molécules ». Ce dernier terme fut inventé par Amadeo Avogadro en 1811 afin de clarifier cette distinction. Mais oublions ce détail pour le moment.)

Puisque les atomes sont invisibles, il fallut de nombreuses années avant que tous les scientifiques soient convaincus par les expériences démontrant leur existence. Au dix-neuvième siècle, l'idée des atomes fut magnifiquement vérifiée par la découverte des
Page 258 « lois » de la chimie et celles du comportement des gaz. Plus tard, les effets du bruit furent découverts.

De nos jours, avec les progrès de la technologie, des atomes isolés peuvent être ob-
Réf. 178, Réf. 179 servés, photographiés, hologrammés, comptabilisés, touchés, déplacés, soulevés, lévités et tournés. Et en fait, comme la matière courante, les atomes possèdent une masse, une taille, une forme et une couleur. Des atomes uniques ont même été utilisés comme am-
Réf. 180 poules et comme lasers.

Actuellement, des chercheurs issus de plusieurs disciplines prennent plaisir à jouer avec les atomes de la même façon que les enfants jouent avec des Lego. La démonstration la plus admirable de ces possibilités est probablement fournie par les nombreuses
Réf. 181 applications du microscope à force atomique. Si jamais vous avez l'occasion d'en voir

* Cette histoire est contée par Lucrèce, dont le nom complet est Titus Lucretius Carus, dans son célèbre texte *De rerum natura*, autour de 60 av. J.-C. (Une traduction anglaise peut être consultée sur http://perseus.uchicago.edu/hopper/text.jsp?doc=Perseus:text:1999.02.0131 et une traduction française sur http://bcs.fltr.ucl.ac.be/LUCR/I.html et http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Lucrece/table.htm.) Lucrèce cite de nombreuses autres preuves. Dans le livre 1, il montre qu'il y a des espaces vides dans les solides – comme l'indiquent la porosité et les différences de densité – et dans les gaz – comme le prouve le vent. Il montre que les odeurs sont dues à des particules, et que c'est ainsi de l'évaporation. (Pouvez-vous trouver
Défi 428 pe plus de pièces à conviction ?) Il explique également que les particules ne peuvent être vues à cause de leur petite taille, mais que leurs effets peuvent être ressentis et qu'ils permettent d'expliquer logiquement toutes les observations.

Surtout si nous imaginons ces particules comme étant des petites billes, nous ne pouvons pas nous em-
Défi 429 d pêcher de qualifier cette idée de typiquement masculine. (Quelle serait l'approche féminine ?)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

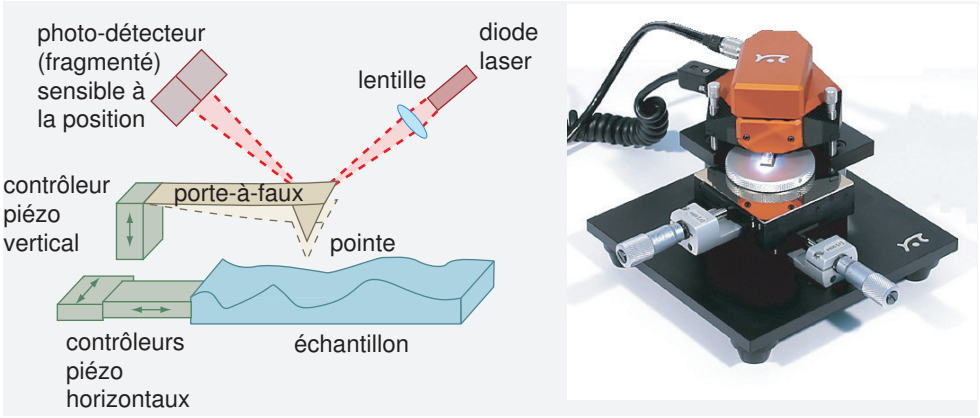


FIGURE 121 Le principe et une réalisation d'un microscope à force atomique. (photographie © Nanosurf)

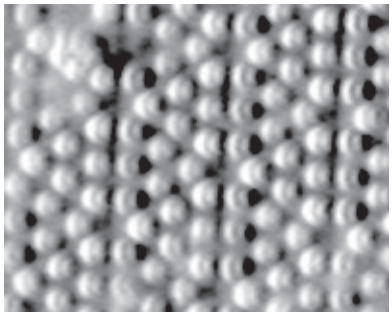


FIGURE 122 Les atomes situés sur la surface d'un cristal de silicium cartographié avec un microscope à force atomique. (© Universität Augsburg)

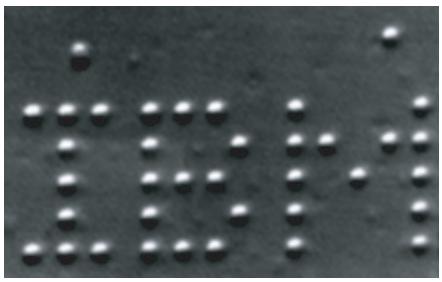


FIGURE 123 Résultat du déplacement d'atomes d'hélium sur une surface métallique. (© IBM)

un, ne la manquez pas* ! C'est un dispositif simple qui jalonne la surface d'un objet à l'aide d'une aiguille dont la pointe est de la taille d'un atome ; de telles aiguilles, généralement en tungstène, sont aisément confectionnées avec une méthode simple de gravure
Réf. 182 à l'eau-forte. Les fluctuations de la hauteur de l'aiguille le long de son trajet au-dessus de la surface sont enregistrées à l'aide d'un rayon lumineux qui s'infléchit. Avec un peu d'attention, les atomes de l'objet peuvent être décelés et rendus visibles sur un écran d'ordinateur. En utilisant des types particuliers de ces microscopes, l'aiguille peut être mise à profit pour déplacer des atomes un par un à des emplacements voulus de la surface. Il est également possible de balayer une surface, de soulever un atome donné et de le projeter en direction d'un spectromètre de masse pour déterminer à quelle famille d'atomes il
Réf. 183 appartient.

* Une version économique ne coûte que quelques milliers d'euros, et vous permettra d'étudier la différence entre une galette de silicium – cristalline – une couche de farine – amorphe et granuleuse – et une surface pure.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

À ce propos, la construction des microscopes à force atomique ne constitue qu'une petite amélioration de ce que la nature à déjà développé par millions : lorsque nous utilisons nos oreilles pour écouter, nous détectons en réalité des variations d'environ 1 nm dans la position du tympan. En d'autres termes, nous avons tous deux « microscopes à force atomique » incorporés dans nos têtes.

En conclusion, la matière n'est pas invariante d'échelle : en particulier, elle n'est ni lisse ni fractale. La matière est constituée d'atomes. Différents types d'atomes, sans compter les diverses combinaisons possibles entre eux, donnent naissance aux différentes déclinaisons de substances. Des images obtenues à partir de microscopes à force atomique indiquent que la taille et l'agencement des atomes représentent la *forme* et l'*étendue* des objets, confirmant le modèle du Lego pour la matière*. Par conséquent, la description du mouvement des objets étendus peut être réduite à la description du mouvement de leurs atomes. Le mouvement atomique formera un thème primordial des pages suivantes. Une de ses répercussions est particulièrement marquante : la chaleur. Avant que nous l'étudiions, nous devons considérer les fluides.

Le mouvement des fluides

Les fluides peuvent être des liquides ou des gaz. Leur mouvement peut être excessivement complexe, comme la Figure 124 le montre. De tels mouvements compliqués sont fréquemment cités comme exemples d'auto-organisation ou de chaos ; ces formes sont
Page 275 discutées ci-dessous.

Comme tout mouvement, le mouvement fluide obéit à la conservation de l'énergie. Dans le cas où il n'y a pas d'énergie convertie en chaleur, la conservation de l'énergie est particulièrement simple. Le mouvement qui ne génère pas de chaleur implique l'absence de tourbillons, un tel mouvement fluide est qualifié de *laminaire*. Si la vitesse du fluide ne dépend pas du temps quelle que soit la position, il est qualifié de *stationnaire*. Pour un mouvement qui est à la fois laminaire et stationnaire, la conservation de l'énergie peut être exprimée à l'aide de la vitesse v et de la pression p :

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho g z = \text{const} \tag{88}$$

où z représente la hauteur au-dessus du sol. C'est l'*équation de Bernoulli*, dans laquelle le premier terme est l'énergie cinétique (par unité de volume) du fluide, et les deux autres termes sont des énergies potentielles (par unité de volume). Le dernier terme n'est important que si le fluide se soulève par rapport au sol. Le second terme est l'énergie potentielle (par unité de volume) qui résulte de la compression du fluide. En réalité, la pression est
Défi 430 e une énergie potentielle par unité de volume.

* L'étude de la matière avec encore plus de raffinement conduit à l'idée dorénavant bien connue que la matière, à des grossissements de plus en plus forts, est faite de molécules, d'atomes, de noyaux, de protons et de neutrons, et finalement de quarks. Les atomes contiennent également des électrons. Un dernier type de matière, les neutrinos, est observé en provenance du Soleil et de certains types de matériaux radioactifs. Et même si les briques fondamentales sont devenues de plus en plus petites avec le temps, l'idée de base demeure identique : la matière est constituée d'entités les plus petites, que l'on appelle aujourd'hui des particules élémentaires. Dans la seconde partie de notre ascension montagneuse nous explorerons cette idée
Page ?? en détail. L'Annexe ?? liste les propriétés mesurées de toutes les particules élémentaires connues.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

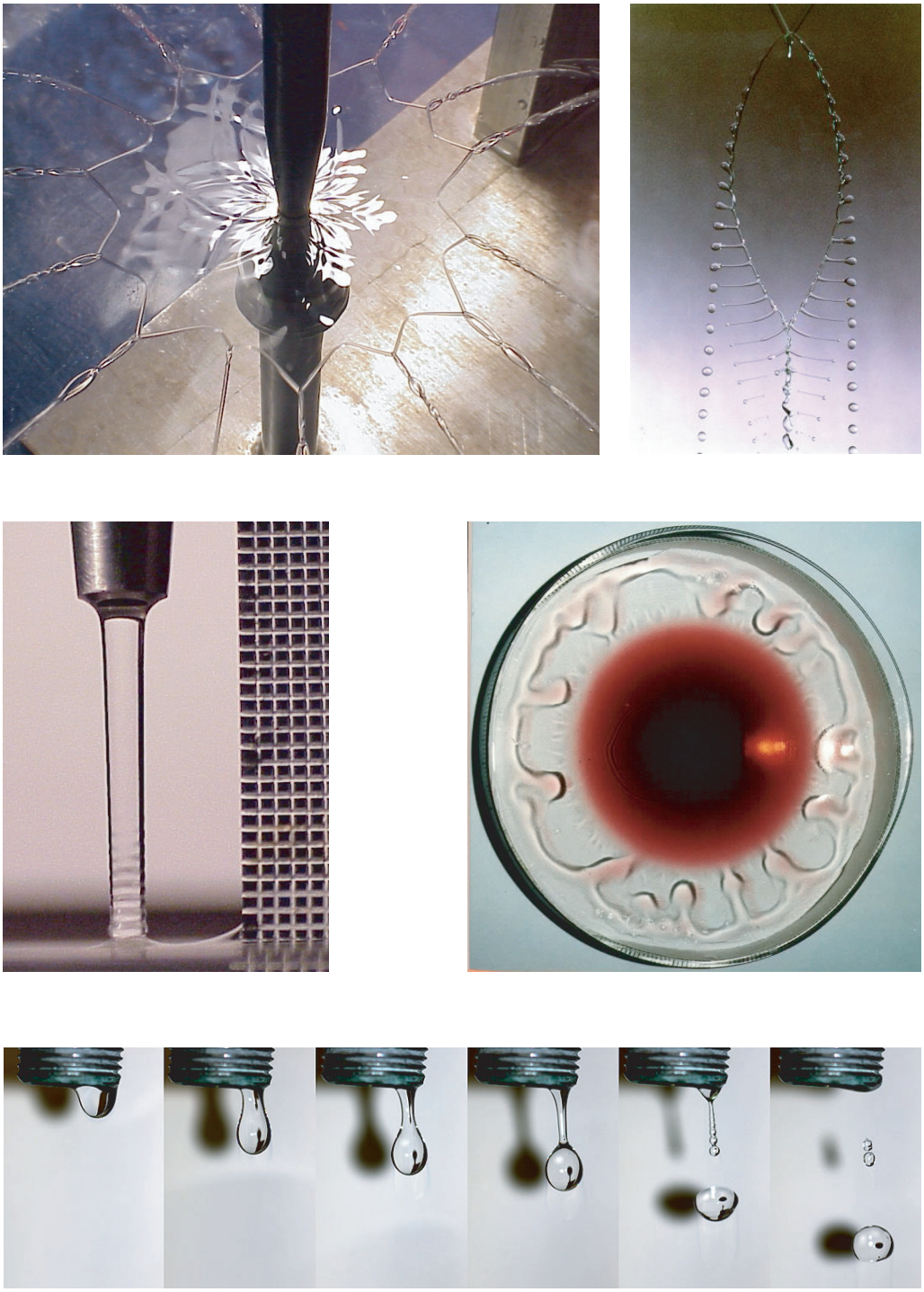


FIGURE 124 Quelques exemples de mouvements fluides : un jet d'eau vertical frappant un obstacle horizontal, deux jets d'un mélange glycérol–eau se rencontrant selon un angle oblique, un jet d'eau pénétrant dans un réservoir, un verre de vin exhibant des larmes (tous © John Bush, MIT) et un robinet qui fuit (© Andrew Davidhazy).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La conservation de l'énergie implique que plus la pression est basse, plus la vitesse d'un fluide devient grande. Nous pouvons utiliser cette relation pour mesurer la vitesse d'un écoulement d'eau stationnaire dans un tube. Nous avons juste besoin de rétrécir partiellement le tube à un emplacement le long de celui-ci, et de mesurer la différence de pression avant et au niveau du goulet d'étranglement du tube. Nous trouvons que la
Défi 431 s vitesse v est donnée par $v = k\sqrt{p_1 - p_2}$. (Que représente la constante k ?) Un dispositif utilisant cette méthode est appelé un tube de Venturi.

Si la géométrie d'un système reste figée et si la vitesse du fluide est accrue, à une certaine vitesse nous observons une transition : le liquide perd sa limpidité, l'écoulement n'est plus stationnaire. Nous voyons cela à chaque fois que nous ouvrons un robinet d'eau. L'écoulement passe de laminaire à turbulent. Dans cette situation, l'équation de Bernoulli n'est plus valide.

La description de la turbulence est certainement le plus ardu de tous les problèmes de la physique. Lorsque le jeune Werner Heisenberg fut assigné à poursuivre les recherches sur la turbulence, il refusa – bien lui en prit – en disant que c'était trop difficile. Il se tourna vers quelque chose de plus facile puis initia et développa à la place la mécanique quantique. La turbulence est un sujet tellement vaste, avec ses nombreux concepts qui restent mal compris, qu'en dépit du nombre et de l'importance de ses applications ce n'est qu'aujourd'hui, au début du vingt et unième siècle, que ses secrets commencent
Réf. 184 à être percés. Il est généralement admis que les équations du mouvement décrivant les fluides, les *équations de Navier–Stokes*, sont suffisantes pour comprendre la turbulence*. Mais les mathématiques derrière elles sont fantastiques. Il existe même une récompense d'un million de dollars offerte par l'Institut Clay de mathématiques pour l'achèvement de certaines étapes sur le chemin de la résolution des équations.

Des systèmes importants qui montrent un écoulement laminaire, des tourbillons et de la turbulence en même temps sont les ailes et les voiles. Toutes les ailes fonctionnent mieux en mode laminaire. L'essentiel d'une aile est qu'elle attribue à l'air une vitesse dirigée vers le bas avec le moins de turbulence possible. (C'est pour minimiser la turbulence que les ailes sont courbées. Si le moteur est très puissant, une aile plate inclinée d'un certain angle fonctionne également. Les fortes turbulences sont aussi un avantage pour atterrir en toute sécurité.) La vitesse dirigée vers le bas de la traînée d'air provoque
Réf. 185 une force centrifuge qui agit sur l'air qui passe au-dessus de l'aile. Cela conduit à une pression plus faible, et donc à un soulèvement. (Les ailes ne sont donc *pas* fondées sur l'équation de Bernoulli, où des pressions plus basses *le long* de l'écoulement conduisent à une vitesse de l'air plus élevée, comme malheureusement de nombreux livres ont l'habitude de le dire. Au-dessus d'une aile, la vitesse plus élevée est reliée à la pression plus basse *à travers* l'écoulement.)

Les vitesses différentes de l'air au-dessus et en dessous de l'aile provoquent des tourbillons aux extrémités de chacune d'elles. Ces tourbillons sont particulièrement importants pour le décollage de n'importe quel insecte, oiseau ou avion. Nous donnons plus
Page ?? loin plus de détails sur les ailes.

* Elles sont baptisées d'après Claude Navier (n. Dijon 1785, d. Paris 1836), important ingénieur français qui dirigea la construction de plusieurs ponts, et George Gabriel Stokes (n. Skreen 1819, d. Cambridge 1903), important physicien et mathématicien irlandais.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Curiosités et défis amusants sur les fluides

Quelle est la quantité d'eau nécessaire pour humidifier l'air dans une pièce en hiver ? À 0 °C, la pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air est de 6 mbar, à 20 °C elle est de 23 mbar. Par conséquent, le réchauffement de l'air en hiver donne tout au plus
Défi 432 e une humidité de 25 %. Pour augmenter l'humidité de 50 %, nous avons donc besoin d'environ 1 litre d'eau pour 100 m^3.

* *

Vous êtes dans un bateau sur un étang avec une pierre, un seau d'eau et un morceau de bois. Qu'advient-il du niveau de l'eau de l'étang après que vous aurez jeté la pierre dedans ? Après que vous aurez jeté l'eau dans l'étang ? Après que vous aurez jeté le morceau
Défi 433 s de bois ?

* *

Défi 434 s Un navire quitte un fleuve pour pénétrer dans la mer. Que se passe-t-il ?

* *

Accrochez un ballon de baudruche sur l'extrémité d'une bouteille et laissez-le suspendu à l'intérieur de la bouteille. Jusqu'où pouvez-vous gonfler le ballon à l'intérieur de la
Défi 435 e bouteille ?

* *

Posez une petite boulette de papier dans l'encolure d'une bouteille horizontale et essayez de souffler dessus pour la faire entrer dedans. Le papier volera *dans votre direction*. Pour-
Défi 436 e quoi ?

* *

Il est possible de faire sauter un œuf d'un coquetier dans un second situé juste derrière
Défi 437 e lui en soufflant dessus. Pouvez-vous exécuter ce tour ?

* *

Durant le dix-septième siècle, des ingénieurs qui avaient besoin de puiser de l'eau faisaient face à un défi. Pour puiser de l'eau depuis un puits minier jusqu'à la surface, aucune pompe à eau n'est concevable si la différence de hauteur est supérieure à 10 m. Pour le double de cette hauteur, nous avons toujours besoin de deux pompes en série, reliées
Défi 438 s par un réservoir intermédiaire. Pourquoi ? Comment les arbres parviennent-ils alors à pomper de l'eau vers le haut sur des hauteurs plus grandes ?

* *

Lorsque l'hydrogène et l'oxygène sont combinés pour former de l'eau, la quantité d'hydrogène nécessaire est exactement le double de la quantité d'oxygène, s'il ne reste aucune quantité de gaz après la réaction. Comment cette observation confirme-t-elle l'existence
Défi 439 s des atomes ?

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

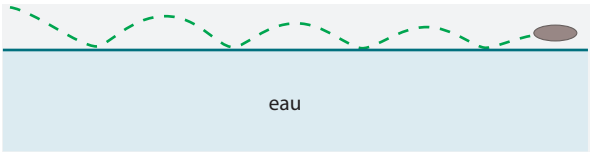


FIGURE 125 Quel est votre propre record du nombre de ricochets ?

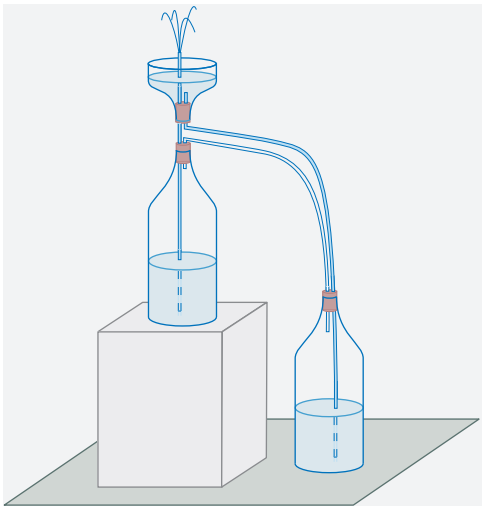


FIGURE 126 La fontaine de Héron.

Défi 440 s Comment les chocolats pralinés fourrés à l'alcool sont-ils fabriqués ? Remarquez que l'alcool n'est pas injecté dedans après leur fabrication, parce qu'il n'y aurait aucune façon de conserver le tout assez hermétiquement.

* *

Combien de fois une pierre peut-elle ricocher lorsqu'elle est projetée sur la surface de l'eau ? Le record mondial actuel fut accompli en 2002 : 40 ricochets. Nous en savons plus Réf. 186 concernant le précédent record mondial, accompli en 1992 : une pierre plate, triangulaire, de la taille de la paume fut projetée à une vitesse de 12 m/s (d'autres disent 20 m/s) et une vitesse de rotation d'environ 14 tours par seconde le long d'une rivière, recouvrant à peu près 100 m avec 38 sauts. (Cette succession de ricochets fut filmée par un caméscope depuis un pont.)

Qu'est-ce qui serait nécessaire pour accroître le nombre de ricochets ? Pouvez-vous Défi 441 r concevoir une machine qui serait un meilleur lanceur que vous-même ?

* *

L'élément le plus abondant dans l'air est l'azote (environ 78 %). Le deuxième élément le plus abondant est l'oxygène (environ 21 %). Quel est le troisième élément le plus abon- Défi 442 s dant ?

* *

L'eau peut s'écouler en montant : la fontaine de Héron en est la preuve vivante. Héron

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

d'Alexandrie (v. 10 à v. 70) décrivit celle-ci il y a 2 000 ans. Elle peut être aisément fabriquée à la maison, en utilisant quelques bouteilles en plastique et une petite tuyauterie.
Défi 443 s Comment fonctionne-t-elle ?

* *

Une ampoule est placée, sous l'eau, dans un cylindre fixe en acier d'un diamètre de 16 cm. Une Fiat Cinquecento (500 kg) est placé sur un piston poussant sur la surface de l'eau.
Défi 444 s L'ampoule résistera-t-elle ?

* *

Défi 445 pe Quel est le gaz le plus dense ? La vapeur la plus dense ?

* *

Chaque année, l'Institut des systèmes maritimes de l'université de Rostock organise une compétition. Le défi est de construire un bateau en papier ayant la charge utile la plus importante. Le bateau en papier doit peser 10 g au maximum, la charge utile est mesurée en déversant des petites charges de plomb dessus, jusqu'à ce que le bateau coule. Le record
Défi 446 e de 2002 s'élève à 2,6 kg. Pouvez-vous atteindre cette valeur ? (Pour plus d'informations, consultez le site Web http://www.paperboat.de.)

* *

Une version moderne d'une ancienne question – déjà formulée par Daniel Colladon (1802–1893) – est la suivante : un navire de masse m sur une rivière est tiré par des chevaux trottant le long de la rive et attachés par des cordes. Si la rivière est constituée d'hélium superfluide, ce qui signifie qu'il n'y a pas de frottement entre le navire et la rivière, quelle est l'énergie nécessaire pour tirer le navire en amont le long de la rivière jusqu'à
Défi 447 s ce qu'une hauteur h ait été franchie ?

* *

L'enseignant suisse Auguste Piccard (1884–1962) était un célèbre explorateur de la stratosphère. Il parvint à une hauteur de 16 km dans son *aérostat*. À l'intérieur de la cabine hermétique suspendue en dessous de son ballon, il avait une pression d'air normale. Toutefois, il avait besoin d'introduire dans la cabine plusieurs cordes attachées au ballon, afin d'être capable de tirer sur celles-ci pour le commander. Comment disposa-t-il les cordes
Défi 448 s dans la cabine tout en empêchant l'air de la quitter ?

* *

Un homme ne peut pas respirer quelle que soit sa profondeur sous l'eau, même s'il a un tube rejoignant la surface. À une profondeur de quelques mètres, essayer d'en faire autant est inévitablement mortel ! Même à une profondeur de 60 cm seulement, le corps
Défi 449 s humain ne peut respirer de cette manière que pendant quelques minutes. Pourquoi ?

* *

Selon sa tenue vestimentaire, un homme en l'air chute avec une vitesse limite d'environ 180 km/h. Combien de temps faut-il pour tomber d'un avion situé à 3 000 m jusqu'à
Défi 450 pe une hauteur de 200 m ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Défi 451 s Plusieurs personnes ont survécu à des chutes libres en sautant depuis des avions situés à mille mètres ou plus, sans même avoir un parachute. Comment cela fut-il possible ?

* *

Défi 452 s La pression liquide dépend de la hauteur. Si la pression sanguine humaine moyenne à la hauteur du cœur est de 13,3 kPa, pouvez-vous deviner sa valeur à l'intérieur du pied en position debout ?

* *

Défi 453 s Le cœur humain pompe le sang à un taux d'environ 0,1 l/s. Un vaisseau capillaire possède un diamètre identique à celui d'un globule rouge, autour de 7 µm, et dans celui-ci le sang se déplace à une vitesse d'un demi-millimètre par seconde. Combien de vaisseaux capillaires y a-t-il chez un homme ?

* *

Réf. 187 Quelques gouttes de thé coulent toujours le long de la partie basse du bec d'une théière (ou alors elles tombent sur la table). Ce phénomène a même été reproduit en utilisant des simulations du mouvement des liquides avec des supercalculateurs, par Kistler et Scriven, en employant les équations de Navier–Stokes. Malgré tout cela, les théières déversent toujours quelques gouttes.

* *

Défi 454 s Les meilleures bulles de savon géantes peuvent être obtenues en mélangeant 1,5 l d'eau, 200 ml de sirop de glucose et 450 ml de liquide vaisselle. Mélangez tout ceci et laissez reposer pendant quatre heures. Vous pouvez alors réaliser les plus grosses bulles en trempant un anneau métallique faisant jusqu'à 100 mm de diamètre dans le mélange. Mais pourquoi les bulles de savon éclatent-elles ?

* *

Défi 455 pe Une goutte d'eau qui tombe dans une casserole contenant de l'huile brûlante danse* sur la surface pendant un temps très long, si l'huile est à plus de 220 °C. Les cuisiniers testent la température de l'huile de cette manière. Pourquoi cet effet, connu sous le nom d'effet Leidenfrost**, se produit-il ?

* *

Défi 456 s Pourquoi les molécules d'air ne tombent-elles pas par terre puis restent ainsi ?

* *

Défi 457 s Réf. 188 Lequel des deux entonnoirs remplis d'eau de la Figure 127 est-il vidé le plus rapidement ? Appliquez la conservation de l'énergie au mouvement du fluide (également appelé « loi » de Bernoulli) pour découvrir la bonne réponse.

* Elle est en réalité en lévitation au-dessus de la surface [N.D.T.].

** Il est nommé d'après Johann Gottlieb Leidenfrost (1715–1794), physicien allemand.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

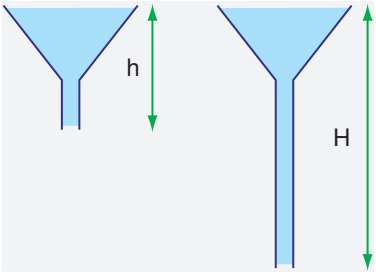


FIGURE 127 Quel entonnoir est plus rapide ?

* *

Comme nous l'avons vu, un écoulement rapide provoque une dépression. Comment les poissons font-ils pour éviter de se faire happer les yeux lorsqu'ils nagent très rapidement ? Défi 458 s

* *

Les balles de golf possèdent des creux pour les mêmes raisons que les balles de tennis sont duveteuses et que l'épiderme des requins et des dauphins n'est pas lisse : des aspérités sur la surface réduisent la résistance à l'écoulement parce que de nombreux petits remous produisent moins de frottement que quelques-uns plus grands. Pourquoi ? Défi 459 pe

* *

Le verre est un solide. Toutefois, de nombreux manuels soutiennent que le verre est un liquide. Cette confusion a été diffusée pendant environ une centaine d'années, probablement à l'origine d'une erreur de traduction d'une phrase d'un manuel allemand publié en 1933 par Gustav Tamman, *Der Glaszustand*. Pouvez-vous donner au moins trois raisons qui prouvent que le verre est un solide et non un liquide ? Défi 460 s

* *

Le record officiel de hauteur atteint par un hélicoptère est de 12 442 m au-dessus du niveau de la mer, bien que celui de 12 954 m ait également été revendiqué. (Le premier fut obtenu en 1972, le second en 2002, tous les deux par des pilotes français dans des hélicoptères français.) Pourquoi, alors, les gens persistent-ils à utiliser leurs jambes pour gravir le sommet du mont Sagarmatha*, la plus haute montagne du monde ? Défi 461 s

* *

Un fil à coudre quelque peu emmêlé se trouve sur la surface d'une coupe remplie d'eau. Le fait de déposer un petit peu de liquide vaisselle à l'intérieur du périmètre délimité par le fil oblige celui-ci à adopter immédiatement une forme circulaire. Pourquoi ? Défi 462 e

* *

Pouvez-vous déposer un mouchoir sous l'eau en utilisant un verre, tout en le gardant sec ? Défi 463 s

* Nom népalais du mont Everest qui signifie « le front du ciel » en sanskrit [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

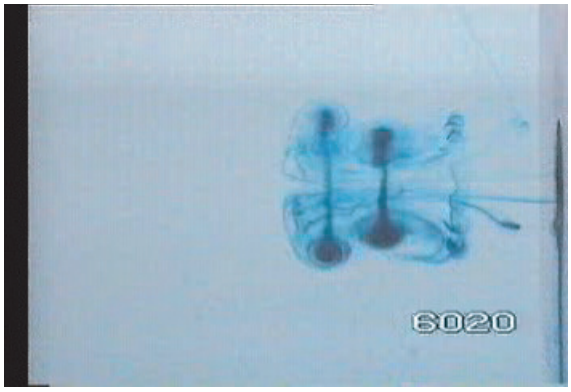


FIGURE 128 Deux anneaux tourbillonnaires sautant l'un par-dessus l'autre. (© Lim Tee Tai)

* *

Êtes-vous capable de souffler sur une balle de ping-pong pour la faire sortir d'un entonnoir ? Que se passe-t-il si vous soufflez dans un entonnoir en direction d'une bougie allumée ?

* *

La chute d'une feuille, avec sa trajectoire complexe, est toujours un sujet d'expérimentation. Nous sommes encore loin d'être capables de prédire le temps que prendra une feuille pour parvenir au sol. Le mouvement de l'air autour d'une feuille n'est pas aisé à décrire. Un des phénomènes les plus simples de l'hydrodynamique demeure également un de ses plus farouches casse-tête.

* *

Les fluides exhibent de nombreux effets captivants. Les bulles de savon dans l'air sont constituées d'un mince film sphérique de liquide avec de l'air de chaque côté. En 1932, des anti-bulles, de minces films sphériques d'air avec du liquide des deux côtés, ont été observées pour la première fois. En 2004, le physicien belge Stéphane Dorbolo et son équipe montrèrent qu'il est possible de les produire dans des expériences simples et, en particulier, dans la bière belge.

Réf. 190

* *

Avez-vous déjà laissé tomber un bonbon Mentos dans une bouteille de Coca Cola Light ? Vous obtiendrez un effet intéressant. (Faites-le à vos propres risques et périls...) Est-il possible de construire une fusée de cette manière ?

Défi 464 e

* *

Une aiguille peut flotter sur l'eau, si vous la déposez avec précaution. Essayez simplement, en utilisant une fourchette.

Défi 465 e

* *

Les fluides exhibent de nombreux mouvements compliqués. Pour en avoir un aperçu,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

jetez un œil sur la magnifique galerie d'images du site Web http://serve.me.nus.edu.sg/limtt. Un des exemples les plus fascinants du mouvement fluide est le motif des tourbillons en anneaux imbriqués les uns dans les autres (comme s'ils jouaient à saute-mouton), indiqué dans la Figure 128. Lim Tee Tai explique qu'il est extrêmement difficile d'obtenir plus de deux anneaux imbriqués, à cause du subtil non-alignement des anneaux tourbillonnaires qui conduit à l'effondrement de ce système.

Défi 466 e

Réf. 194

Curiosités et défis amusants sur les solides

Quelle est la longueur maximale d'un câble métallique suspendu verticalement ? Un câble pourrait-il être descendu depuis un satellite géostationnaire jusqu'à la Terre ? Cela signifierait que nous pourrions réaliser un « ascenseur » spatial. Quelle longueur le câble devrait-il avoir ? Quel poids ? Comment pourriez-vous construire un tel système ? Quelles embûches rencontreriez-vous ?

Défi 467 s

* *

La matière est constituée d'atomes. Au cours des siècles, l'entêtement persistant de nombreuses personnes à nier cette idée a conduit à la perte de nombreux trésors. Durant plus de mille ans, les gens pensaient que les véritables perles pourraient être discernées des fausses en les martelant avec une masse : seules les fausses perles se briseraient. Pourtant, *toutes* les perles se brisent. (Même les diamants se brisent dans cette situation.) Par conséquent, la grande majorité des perles magnifiques collectées dans le monde ont été fracassées en morceaux.

* *

Les livres de bandes dessinées ont des ennuis avec le concept d'atomes. Astérix pourrait-il réellement balancer des Romains en l'air en utilisant son poing ? Les coups de feu précis du revolver de Lucky Luke sont-ils possibles ? Le fil de soie de Spiderman peut-il le supporter dans ses balancements de building en building ? Bip Bip peut-il s'immobiliser dans sa course effrénée en trois temps trois mouvements ? Peut-on commander au Soleil de s'arrêter dans le ciel ? Les vaisseaux spatiaux planent-ils en utilisant du carburant ? Prenez n'importe quel héros de bande dessinée et demandez-vous si la matière faite d'atomes lui permettrait de réaliser les prouesses dont il semble capable. Vous découvrirez que la plupart des dessins animés sont comiques précisément parce qu'ils présupposent que la matière n'est pas constituée d'atomes, mais qu'elle est continue ! Dans un certain sens, les atomes assimilent la vie à une aventure sérieuse.

Défi 468 e

* *

Les hommes peuvent-ils provoquer des séismes ? Que se passerait-il si 1 000 millions d'Indiens sautaient en même temps de leur table de cuisine sur le sol ?

Défi 469 s

En réalité, plusieurs tremblements de terre particulièrement violents *ont été* déclenchés par les êtres humains. Cela s'est produit lorsque des barrages fluviaux ont été remplis, ou quand de l'eau a été injectée dans des forages miniers. Il a été suggéré que l'extraction des eaux souterraines profondes provoquerait également des séismes. Si cela est confirmé, une proportion notable de tous les tremblements de terre pourrait avoir été déclenchée par l'homme.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Comment une pointe d'une stalactite peut-elle être distinguée d'une pointe d'une sta-
Défi 470 s lagmite ? Ces différences existent-elles aussi pour des pics de glace ?

* *

Quelle masse beaucoup plus grande vos pèse-personnes indiqueraient-ils si vous vous
Défi 471 s teniez debout dessus dans un espace vide ?

* *

Le corps humain est l'un des corps étendus les plus complexes. Dans de récentes simulations sur le comportement d'êtres humains lors d'accidents de voiture, les modèles les plus avancés incluent les côtes, les vertèbres ainsi que tous les autres os et les divers organes. Pour chaque composant, ses propriétés spécifiques à la déformation sont prises en compte. Avec de tels modèles et de telles simulations, la protection des passagers et des conducteurs dans les véhicules peut être optimisée.

* *

Le trou le plus profond jamais foré sur la Terre fait 12 km de profondeur. En 2003, quelqu'un suggéra d'élargir un tel trou et d'y déverser des millions de tonnes de fer liquide. Il affirmait que le fer coulerait vers le centre de la Terre. Si un dispositif de mesure communicant était abandonné dans le fer, il pourrait transmettre ses observations jusqu'à la surface en utilisant des ondes sonores. Pouvez-vous fournir quelques raisons qui montrent
Défi 472 s que cela ne pourrait pas fonctionner ?

* *

La puissance économique d'une nation a longtemps été associée à sa capacité à produire de l'acier de bonne qualité. En réalité, la révolution industrielle commença avec la production massive d'acier. Chaque scientifique devrait connaître les principes fondamentaux concernant l'acier. L'*acier* est une combinaison de fer et de carbone auxquels peuvent également être ajoutés d'autres éléments, principalement des métaux. Nous pouvons distinguer trois principaux types d'acier, en fonction de sa structure cristalline. Les *aciers ferritiques* possèdent une structure cristalline cubique à corps centré, comme indiqué sur la Figure 129, les *aciers austénitiques* possèdent une structure cristalline cubique à faces centrées et les *aciers martensitiques* ont une structure tétragonale à corps centré. Le Tableau 29 fournit plus de détails.

La photographie de l'Atomium est aimablement fournie par Eric Vandeginste (droits d'auteurs réservés), et est tirée de son site Web http://atmospheres.be. L'Atomium lui-même est protégé par les droits d'auteurs, la permission de la reproduire ici a été accordée par Asbl Atomium Vzw et SABAM Belgium.

* *

Le claquement du fouet est un phénomène élémentaire qui nécessite une explication com-
Réf. 189 plexe. Depuis le travail expérimental de Peter Krehl, nous avons appris que le fouet claque lorsque l'extrémité atteint une vitesse égale au *double* de la vitesse du son. Pouvez-vous
Défi 473 pe imaginer pourquoi ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 29 Les types d'acier, leurs propriétés et utilisations.

Acier ferritique	Acier austénitique	Acier martensitique
acier « ordinaire »	acier « mou »	acier de grande dureté, fragile
cubique à corps centré (ccc)	cubique à faces centrées (cfc)	tétragonale à corps centré (tcc)
fer et carbone	fer, chrome, nickel, manganèse, carbone	acier au carbone et alliages
Exemples		
constructions en acier	la majorité des aciers inoxydables (18/8 Cr/Ni)	surfaces des forets de perçeuses
tôles en acier de voiture	ustensiles de cuisine	lames de couteaux
Navires en acier	industrie alimentaire	ressorts en acier, vilebrequins
ferrite inoxydable à 12 % Cr	aciers Cr/V pour réacteurs nucléaires	
Propriétés		
phases décrites par le diagramme de phase fer-carbone	phases décrites par le diagramme de Schaeffler	phases décrites par le diagramme fer-carbone et le diagramme TTT (transformation temps–température)
en équilibre à température ambiante (TA)	certains alliages en équilibre à TA	n'est pas en équilibre à TA, mais stable
les propriétés mécaniques et la taille du grain dépendent du traitement thermique	les propriétés mécaniques et la taille du grain dépendent du pré-traitement thermo-mécanique	les propriétés mécaniques et la taille du grain dépendent fortement du traitement thermique
endurci en réduisant la taille du grain, par forgeage, en augmentant la quantité de carbone ou par nitration	endurci uniquement par travail à froid	de toute façon très dure – façonné par irradiation laser, induction thermique, etc.
grains de ferrite et perlite, avec cémentite (Fe_3C)	grains d'austénite	grains de martensite
ferromagnétique	pas ou faiblement magnétique	ferromagnétique

* *

Une chaîne de bicyclette est un objet étendu dépourvu de raideur. Toutefois, si elle est mise en rotation rapide, elle acquiert une raideur dynamique et peut rouler de haut en bas sur un plan incliné ou sur le sol. Cet effet surprenant peut être contemplé sur http://www.iwf.de/NR/rdonlyres/EEFA7FDC-DDDC-490C-9C49-4537A925EFE6/718/C14825.asx ou http://www.iwf.de/NR/rdonlyres/EEFA7FDC-DDDC-490C-9C49-4537A925EFE6/793/C148292.smil.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 129 Les aciers ferritiques sont ccc (cubiques à corps centré), comme le montre le célèbre *Atomium* à Bruxelles, une partie d'un cristal de fer agrandi jusqu'à une hauteur de plus de 100 m (photo © Eric Vandeginste, le mot Atomium lui-même est déposé par Atomium – SABAM)

* *

Les dispositifs mécaniques ne sont pas abordés dans ce texte. Beaucoup de progrès sont aujourd'hui encore réalisés dans ce domaine. Par exemple, des individus ont construit
Réf. 191 des robots qui sont capables de rouler sur un monocycle. Mais même la physique de la
Réf. 192 conduite humaine du monocycle n'est pas simple.

* *

Il existe de nombreux arguments contre l'existence des atomes assimilés à des billes dures.
Réf. 193 Thomson-Kelvin le mit par écrit : « L'hypothèse monstrueuse de morceaux de matière infiniment forts et infiniment rigides. » Même si Thomson avait raison dans son com-
Défi 474 s mentaire, les atomes existent. Pourquoi ?

Qu'est-ce qui peut bouger dans la nature ?

Avant de passer à l'étape suivante pour décrire le mouvement de manière globale, nous allons examiner les possibilités de mouvement dans la vie quotidienne. Un tour d'horizon en est donné dans le Tableau 30. Les domaines qui appartiennent à la vie quotidienne – le mouvement des fluides, de la matière, des types de matière, de la chaleur, de la lumière et de la charge – constituent les domaines de la physique des milieux continus.

Dans la physique des milieux continus, il y a trois domaines que nous n'avons pas encore étudiés : le mouvement de la charge électrique et de la lumière, appelé électrodynamique, le mouvement de la chaleur, appelé thermodynamique, et le mouvement du vide. Une fois que nous aurons exploré ces domaines, nous aurons achevé la première étape de notre description du mouvement : la physique des milieux continus. En physique des milieux continus, le mouvement et les entités mobiles sont décrits avec des

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 30 Quantités étendues dans la nature, c'est-à-dire des quantités qui *s'écoulent* et *s'accumulent*.

Domaine	Quantité étendue (transporteur d'énergie)	Courant (intensité du flux)	Quantité intrinsèque (force motrice)	Flux d'énergie (puissance)	Résistance au déplacement (intensité de la création d'entropie)
Rivières	masse m	écoulement massique m/t	différence de hauteur gh	$P = gh\,m/t$	$R_m = ght/m$ $[m^2/s\,kg]$
Gaz	volume V	écoulement volumique V/t	pression p	$P = pV/t$	$R_V = pt/V$ $[kg/s\,m^5]$
Mécanique	quantité de mouvement $\mathbf{p}$	force $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$	vitesse $\mathbf{v}$	$P = \mathbf{v}\,\mathbf{F}$	$R_p = t/m$ [s/kg]
	moment cinétique $\mathbf{L}$	couple $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt$	vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}$	$P = \boldsymbol{\omega}\,\mathbf{M}$	$R_L = t/mr^2$ $[s/kg\,m^2]$
Chimie	quantité de matière n	écoulement de matière $I_n = dn/dt$	potentiel chimique μ	$P = \mu\,I_n$	$R_n = \mu t/n$ $[Js/mol^2]$
Thermodynamique	entropie S	écoulement d'entropie $I_S = dS/dt$	température T	$P = T\,I_S$	$R_S = Tt/S$ $[K^2/W]$
Lumière	comme tout rayonnement sans masse, elle peut s'écouler mais ne peut s'accumuler.				
Électricité	charge q	courant électrique $I = dq/dt$	potentiel électrique U	$P = U\,I$	$R = U/I$ [Ω]
Magnétisme	on ne rencontre aucune source magnétique accumulable dans la nature.				
Physique nucléaire	des quantités étendues existent, mais n'apparaissent pas dans la vie quotidienne.				
Gravitation	un espace vide peut bouger et s'écouler, non observé dans la vie quotidienne.				

quantités continues qui peuvent prendre n'importe quelle valeur, y compris des valeurs arbitrairement petites ou arbitrairement grandes.

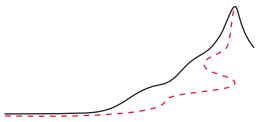
Mais la matière *n'est pas* continue. Nous avons déjà vu que la matière ne peut pas être indéfiniment divisée en entités toujours plus petites. En réalité, nous découvrirons qu'il existe des expériences précises qui définissent des limites aux valeurs observées pour *tous* les domaines de la physique des milieux continus. Il y a une limite à la masse, à la vitesse, au moment cinétique, à la force, à l'entropie et à la variation de la charge. Les

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

conséquences de ces découvertes forment la seconde étape de notre description du mouvement : la théorie quantique et la relativité. La théorie quantique est basée sur des limites microscopiques, la relativité est fondée sur des limites macroscopiques. La troisième et dernière étape de notre description du mouvement sera accomplie par l'unification de la théorie quantique et de la relativité générale.

Chaque domaine de la physique, quelle que soit son appartenance à l'une de ces étapes précitées, décrit finalement le changement à l'aide de deux quantités : l'énergie et une
Réf. 196 quantité étendue caractéristique du domaine étudié. Une quantité observable est qualifiée d'*étendue* si elle augmente avec la taille du système. Le Tableau 30 en fournit une synthèse. Les quantités intrinsèque et étendue associées à ce que nous appelons dans le langage courant la « chaleur » sont la *température* et l'*entropie*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 12

DE LA CHALEUR À L'INVARIANCE TEMPORELLE

Nous continuons notre brève déambulation à travers le domaine des descriptions générales du mouvement avec un tour d'horizon sur la chaleur et les concepts principaux qui lui sont associés. Pour notre propos, nous n'aurons besoin de connaître que les prin-
Réf. 197 cipes fondamentaux de la chaleur. Les connaissances de base qui sont enseignées à l'école sont pour la plupart suffisantes.

Température

Les corps macroscopiques, c'est-à-dire les corps constitués de nombreux atomes, ont une température. La température d'un corps macroscopique est un élément de son état. On observe que deux corps quelconques en contact tendent ensemble à avoir la même température : la température est contagieuse. En d'autres termes, la température décrit une situation d'équilibre. L'existence de celle-ci et sa contagiosité sont souvent nommées le *principe zéro de la thermodynamique*. Le réchauffement est l'augmentation de la température.

Comment la température est-elle mesurée ? Le dix-huitième siècle mit le doigt sur la réponse la plus évidente : la notion qui définit et quantifie le mieux la température est celle de l'*expansion des gaz*. Pour l'exemple le plus simple, appelé gaz *parfait*, le produit de la pression p par le volume V est proportionnel à la température :

$$pV \sim T \,. \tag{89}$$

La constante de proportionnalité est fixée par la *quantité* de gaz utilisé. (Nous en saurons plus bientôt.) La relation du gaz parfait nous permet de déterminer la température en mesurant la pression et le volume. C'est de cette manière que la température (absolue) a
Réf. 198 été définie et mesurée durant environ un siècle. Pour définir l'*unité* de température, nous avons seulement besoin de fixer la quantité de gaz prise en considération. Il est coutumier
Page 300 de fixer cette quantité à 1 mol : pour l'oxygène cela correspond à 32 g. Cette constante de proportionnalité, appelée *constante du gaz parfait* R, est définie comme étant égale à $R = 8{,}3145\,\mathrm{J/mol\,K}$. Ce nombre a été choisi dans le but d'obtenir la meilleure adéquation avec l'échelle de température établie indépendamment de celle-ci : le Celsius. En fixant la constante du gaz parfait de cette manière nous définissons 1 K, ou un Kelvin, comme étant l'unité de la température. En termes concis, une augmentation de température d'un Kelvin est définie comme étant l'augmentation de température qui provoque l'accroissement du volume d'un gaz parfait – à pression constante – d'un rapport de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

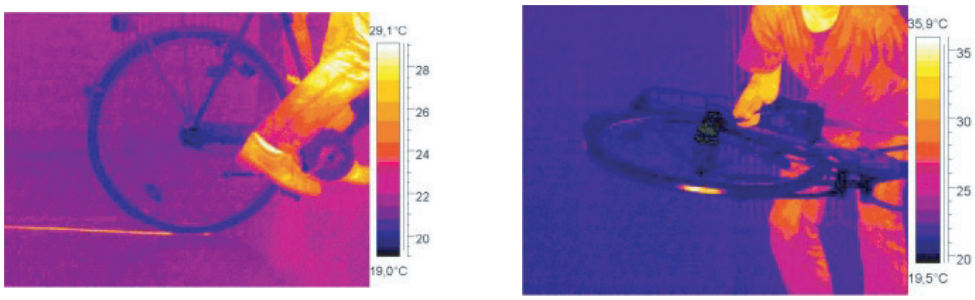


FIGURE 130 Le freinage produit de la chaleur sur le sol et dans le pneu. (© Klaus-Peter Möllmann et Michael Vollmer)

Défi 475 pe 1/273,15 ou 0,3661 %.

En règle générale, si nous avons besoin de déterminer la température d'un objet, nous prenons une mole de gaz, nous la mettons en contact avec l'objet, patientons un instant, et mesurons alors la pression et le volume du gaz. La relation (89) du gaz parfait détermine alors la température. De façon plus importante, la relation du gaz parfait indique qu'il existe une température la plus basse dans la nature, à savoir la température à laquelle un gaz parfait aurait un volume quasi nul. Cela devrait survenir à $T = 0$ K, c'est-à-dire à −273,15 °C. Certes, d'autres effets, comme le volume des atomes eux-mêmes, empêchent toujours le volume du gaz d'atteindre une valeur nulle. Le *troisième principe de la thermodynamique* fournit une autre raison pour laquelle cela est également impossible.

La température atteinte par une civilisation peut être utilisée comme une mesure de son progrès technologique. Nous pouvons définir l'âge du bronze (1,1 kK, 3500 av. J.-C.), l'âge du fer (1,8 kK, 1000 av. J.-C.), l'âge électrique (3 kK, à partir de env. 1880) et l'âge atomique (plusieurs MK, à partir de 1944) de cette manière. En tenant compte également de la quête vers les températures les plus basses, nous pouvons définir l'âge
Réf. 199 quantique (4 K, depuis 1908).

Le réchauffement implique l'existence d'un flux d'énergie. Par exemple, le frottement échauffe et ralentit des corps en mouvement. Il y a longtemps, la « création » de la chaleur par du frottement fut même testée expérimentalement. On montra que la chaleur pouvait être produite à partir du frottement, à l'aide seulement d'une friction continuelle,
Réf. 195 sans aucune restriction (un exemple est indiqué dans la Figure 130). Cette « création » implique que la chaleur n'est pas un fluide matériel extorqué d'un corps – laquelle dans cette situation serait épuisée au bout d'un certain temps – mais quelque chose d'autre. En réalité, aujourd'hui, nous savons que la chaleur, bien qu'elle se comporte d'une certaine manière comme un fluide, est due au mouvement désordonné des particules. La conclusion de ces recherches est simple. Le frottement est la transformation de l'énergie mécanique en *énergie thermique*.

Pour réchauffer 1 kg d'eau de 1 K avec du frottement, il faut transformer 4,2 kJ d'énergie mécanique. Le premier à avoir mesuré cette quantité avec précision fut, en 1842, le physicien allemand Julius Robert Mayer (1814–1878). Il considérait son expérience comme une preuve de la conservation de l'énergie. En réalité, il fut la première personne à formuler celle-ci ! Cela semble être embarrassant pour la physique moderne qu'un médecin fût le premier à démontrer la conservation de l'énergie et, du reste, qu'il fût ridiculisé par la plupart des physiciens de son époque. Pire, la conservation de l'énergie ne fut

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 31 Quelques valeurs de température.

Observation	Température
Température la plus petite, mais inaccessible	0 K = −273,15 °C
Dans le cas des lasers, il peut parfois y avoir un sens à parler de température négative.	
Température qu'un vide parfait aurait à la surface de la Terre Page ??	40 zK
Gaz de sodium dans certaines expériences de laboratoire – système matériel le plus froid réalisé par l'homme et peut-être dans l'univers	0,45 nK
Température du fond cosmologique des neutrinos dans l'univers	≈ 2 K
Température du fond cosmologique du gaz de photons (ou fond de rayonnement cosmologique) dans l'univers	2,7 K
Hélium liquide	4,2 K
Point triple de l'oxygène	54,3584 K
Azote liquide	77 K
Temps le plus froid jamais mesuré (Antarctique)	185 K = −88 °C
Point de congélation de l'eau à pression normale	273,15 K = 0,00 °C
Point triple de l'eau	273,16 K = 0,01 °C
Température moyenne à la surface de la Terre	287,2 K
La plus petite température inconfortable pour la peau	316 K (normale + 10 K)
Intérieur du corps humain	310,0 ± 0,5 K = 36,8 ± 0,5 °C
Temps le plus chaud mesuré	343,8 K = 70,7 °C
Point d'ébullition de l'eau à pression normale	373,13 K ou 99,975 °C
Bronze liquide	≈ 1 100 K
Fer pur liquide	1 810 K
Point de congélation de l'or	1 337,33 K
Filament incandescent d'une ampoule	2,9 kK
Centre de la Terre	4 kK
Surface du Soleil	5,8 kK
L'air dans l'éclair foudroyant	30 kK
Surface d'étoile la plus chaude (au centre de NGC 2240)	250 kK
Espace entre la Terre et la Lune (il n'y a pas de coquille)	jusqu'à 1 MK
Centre du Soleil	20 MK
À l'intérieur du tokamak à fusion nucléaire JET	100 MK
Centre des astres les plus chauds	1 GK
Température maximale des systèmes sans création de paire électron–positron	≈ 6 GK
L'univers lorsqu'il avait 1 s	100 GK
Température de Hagedorn	1,9 TK
Collisions d'ions lourds – valeur max. anthropique	jusqu'à 3,6 TK
Température de Planck, limite maximale dans la nature	10^{32} K

acceptée que lorsqu'elle fut reexprimée de nombreuses années plus tard par deux autori-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tés en la matière : Hermann von Helmholtz – lui-même également médecin reconverti en physicien – et William Thomson, qui avait également cité les recherches similaires mais postérieures de James Joule*. Chacun d'entre eux reconnut la prévalence de Mayer. La publicité faite par William Thomson conduisit par la suite à l'appellation de l'unité de l'énergie en l'honneur de Joule.

En résumé, la somme de l'énergie mécanique et de l'énergie thermique est constante. C'est ce que nous appelons généralement le *premier principe de la thermodynamique*. De manière équivalente, il est impossible de produire de l'énergie mécanique sans compenser celle-ci par une certaine autre forme d'énergie. C'est un énoncé fondamental, parce que par-dessus tout il signifie que l'humanité s'arrêtera de vivre un jour. En fait, nous vivons principalement grâce à l'énergie du Soleil, et puisque le Soleil est de taille finie, son contenu en énergie se consumera tôt ou tard. Pouvez-vous estimer quand cela surviendra ?

Défi 476 s

Il existe également un deuxième (en sus du troisième déjà mentionné) principe de la thermodynamique, lequel sera présenté plus loin. L'étude de ces thèmes est dénommée la *thermostatique* si les systèmes concernés sont en équilibre, et la *thermodynamique* s'ils ne le sont pas. Dans ce dernier cas, nous discernons les situations *proches* de l'équilibre, quand les concepts d'équilibre tels que la température peuvent encore être utilisés, des situations *éloignées* de l'équilibre, comme l'auto-organisation, où de tels concepts ne peuvent généralement pas être appliqués.

Page 275

Y a-t-il un sens à distinguer l'énergie thermique de la chaleur ? La réponse est oui. De nombreux textes anciens utilisent le mot « chaleur » pour exprimer la même chose que l'énergie thermique. Cependant cela est confus : dans ce texte « chaleur » est utilisé, en accord avec les pratiques modernes, comme étant le terme courant employé pour désigner l'entropie. L'énergie thermique et la chaleur s'écoulent d'un corps à un autre, et s'accumulent tous les deux. Ils n'ont aucune masse mesurable**. À la fois la quantité d'énergie thermique et la quantité de chaleur à l'intérieur d'un corps augmentent avec l'augmentation de température. La relation précise sera donnée sous peu. Mais la chaleur possède de nombreuses autres propriétés intéressantes et d'anecdotes à raconter. De celles-ci, deux sont particulièrement importantes : premièrement, la chaleur est issue des particules, et, deuxièmement, la chaleur est au cœur de la démarcation entre le passé et le futur. Ces deux histoires sont entrelacées.

* Hermann von Helmholtz (n. Potsdam 1821, d. Berlin 1894), scientifique prussien prépondérant. William Thomson (devenu plus tard Lord Kelvin) (1824–1907), éminent physicien irlandais. James Prescott Joule (1818–1889), physicien anglais. Joule est prononcé de telle façon qu'il rime avec « cool », comme ses descendants aiment à le souligner. (La prononciation du nom « Joule » varie d'une famille à l'autre.)

** Cela pourrait changer à l'avenir, quand les mesures des masses augmenteront en précision, permettant ainsi la détection d'effets relativistes. Dans ce cas, l'augmentation de température peut être détectée par le biais de son augmentation de masse associée. Toutefois, de tels changements sont perceptibles seulement avec une douzaine de chiffres, voire plus, dans la précision des mesures de masse.

Page 61

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 32 Quelques valeurs mesurées d'entropie.

Processus/Système	Valeur d'entropie
Fonte de 1 kg de glace	1,21 kJ/K kg = 21,99 J/K mol
Eau dans des conditions normales	70,1 J/K mol
Ébullition de 1 kg d'eau liquide à 101,3 kPa	6,03 kJ/K= 110 J/K mol
Fer dans des conditions normales	27,2 J/K mol
Oxygène dans des conditions normales	161,1 J/K mol

Entropie

> – C'est irréversible.
> – Comme mon imperméable !
> Mel Brooks, *Spaceballs*, 1987

Réf. 196

Chaque domaine de la physique décrit le changement en relation avec deux quantités : l'énergie et une quantité étendue caractéristique du domaine étudié. Bien que la chaleur soit reliée à l'énergie, la quantité que les physiciens nomment généralement chaleur *n'est pas* une quantité étendue. Pire, ce que les physiciens appellent chaleur n'est pas la même chose que ce que nous appelons chaleur dans notre langage courant. La quantité étendue correspondant à ce que nous appelons « chaleur » dans la langue courante est appelée *entropie**. L'entropie décrit la chaleur de la même façon que la quantité de mouvement décrit le mouvement. Lorsque deux objets différents en température sont mis en contact, un écoulement d'entropie a lieu entre eux, comme l'écoulement de la quantité de mouvement qui se produit lorsque deux objets de vitesses différentes se rencontrent. Définissons la notion d'entropie plus explicitement et explorons ses propriétés avec un peu plus de précision.

L'entropie mesure le degré de *mélange* de l'énergie à l'intérieur d'un système, c'est-à-dire comment l'énergie est répandue ou partagée parmi les constituants d'un système. Donc, l'entropie se cumule lorsque des systèmes identiques sont réunis pour n'en former qu'un. Quand deux bouteilles d'un litre d'eau à la même température sont versées ensemble, l'entropie de l'eau s'ajoute.

Comme n'importe quelle autre quantité étendue, l'entropie peut être accumulée dans un corps, elle peut s'écouler dans ou en dehors des corps. Lorsque l'eau est transformée en vapeur, l'entropie ajoutée dans l'eau est en réalité contenue dans la vapeur. En bref, l'entropie est ce qui est appelé « chaleur » dans notre langage quotidien.

Contrairement à plusieurs autres quantités étendues importantes, l'entropie n'est pas conservée. Le partage de l'énergie dans un système peut être accru, par exemple en le réchauffant. Cependant, l'entropie est « à moitié conservée » : dans les systèmes isolés, l'entropie ne décroît pas, le mélange ne peut pas être défait ou annulé. Ce qui est appelé équilibre est simplement la situation du mélange** le plus élevé possible. En résumé, l'en-

* Le terme « entropie » fut inventé par le physicien allemand Rudolph Clausius (1822–1888) en 1865. Il le formula à partir du grec ἐν « en » et τρόπος « direction », pour lui donner une consonance similaire à « énergie ». Il a toujours possédé la signification donnée ici.

** En physique, on parle plus exactement du *désordre* [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tropie dans un système isolé augmente jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur la plus élevée possible.

Lorsqu'un morceau de rocher est détaché d'une montagne, il chute, dégringole dans la vallée, se réchauffe un petit peu, et en fin de compte s'immobilise. Le processus opposé, par lequel un rocher se refroidit et tombe vers le haut, n'est jamais observé. Pourquoi ? Le mouvement inverse ne contredit aucune loi ou aucun modèle que nous ayons déduit jusqu'à présent concernant le mouvement.

Défi 477 pe

Les rochers ne tombent jamais vers le haut parce que les montagnes, les vallées et les roches sont constituées de nombreuses particules. Les mouvements des systèmes comportant de nombreuses particules, particulièrement dans le domaine de la thermostatique, sont appelés des *processus*. La distinction entre des processus *réversibles*, tels que la trajectoire d'une pierre lancée, et des processus *irréversibles*, tels que la dégringolade du rocher mentionné ci-dessus, est centrale en thermostatique. Les processus irréversibles sont tous ces processus dans lesquels le frottement et ses généralisations jouent un rôle. Ils sont ceux qui augmentent la répartition ou le mélange de l'énergie. Ils sont prépondérants : s'il n'y avait pas de frottement, les boutons des chemises et les lacets des chaussures ne resteraient pas attachés, nous ne pourrions pas marcher ou courir, les machines à café ne pourraient délivrer du café, et, peut-être encore plus important que tout le reste, nous n'aurions pas de mémoire.

Réf. 200

Page ??

Les processus irréversibles, au sens où ce terme est utilisé en thermostatique, transforment le mouvement macroscopique en mouvement désordonné de la part de tous les petits constituants microscopiques impliqués : ils augmentent le partage et le mélange de l'énergie. Les processus irréversibles ne sont donc pas *rigoureusement* irréversibles – mais leur renversement est extrêmement improbable. Nous pouvons dire que l'entropie mesure la « quantité d'irréversibilité » : elle quantifie le degré de mélange ou de désordre qu'un mouvement collectif a subi.

L'entropie n'est pas conservée. L'entropie – la « chaleur » – peut survenir de nulle part, puisque la répartition ou le mélange d'énergie peut se produire spontanément, de lui-même. Par exemple, quand deux liquides différents de même température sont mélangés – comme de l'eau avec de l'acide sulfurique – la température finale de la mixture peut être différente. De façon similaire, quand des courants électriques circulent à travers des matériaux à température ambiante, le système peut se réchauffer ou se refroidir, en fonction du matériau.

Le *second principe de la thermodynamique* déclare que « l'entropie n'est jamais ce qu'elle était ». Plus précisément, *l'entropie dans un système isolé tend vers son maximum*. Ici, un *système isolé* est un système qui n'échange pas d'énergie ou de matière avec son environnement. Pouvez-vous en imaginer un exemple ?

Défi 478 pe

L'entropie ne décroît jamais. La vie de tous les jours montre que, dans un système isolé, le désordre augmente avec le temps, jusqu'à ce qu'il atteigne un certain maximum. Pour réduire le désordre, nous avons besoin d'exercer un effort, c'est-à-dire du travail et de l'énergie. En d'autres termes, afin de réduire le désordre dans un système, nous avons besoin de relier ce système à une source d'énergie d'une manière particulièrement élaborée. Les réfrigérateurs nécessitent du courant électrique précisément pour cette raison.

Parce que l'entropie ne diminue jamais, la *couleur blanche ne persiste jamais*. Toutes les fois que le désordre augmente, la couleur blanche devient « sale », habituellement grise ou marron. C'est probablement pour cette raison que les objets blancs, comme les vê-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tements blancs, les maisons blanches et les sous-vêtements blancs, sont appréciés dans notre société. Les objets blancs défient le désordre.

L'entropie permet de définir le concept d'*équilibre* plus précisément comme étant l'état d'entropie maximale, ou de répartition maximale d'énergie.

Courant d'entropie

Nous savons par l'expérience quotidienne que le transport d'une quantité étendue implique systématiquement du frottement. Le frottement implique de la création d'entropie. En particulier, la circulation de l'entropie elle-même produit de l'entropie supplémentaire. Par exemple, quand un logement est chauffé, de l'entropie est produite dans les murs. Le réchauffement implique de conserver une différence de température ΔT entre l'intérieur et l'extérieur de l'appartement. Le flux J de chaleur traversant un mètre carré de mur est donné par

$$J = \kappa \Delta T = \kappa (T_{\text{i}} - T_{\text{e}}) \tag{90}$$

où κ représente une constante caractérisant l'aptitude du mur à conduire la chaleur. Pendant qu'il conduit la chaleur, le mur *produit* également de l'entropie. La création d'entropie σ est proportionnelle à la différence entre les courants d'entropie intérieur et extérieur. En d'autres termes, nous avons

$$\sigma = \frac{J}{T_{\text{e}}} - \frac{J}{T_{\text{i}}} = \kappa \frac{(T_{\text{i}} - T_{\text{e}})^2}{T_{\text{i}} T_{\text{e}}} \ . \tag{91}$$

Remarquez que nous avons supposé dans ces calculs que tout ce qui est situé dans chaque tranche parallèle au mur est proche de l'équilibre, hypothèse raisonnable dans la vie courante. Un exemple typique d'un mur convenable possède une valeur $\kappa = 1\,\text{W/m}^2\text{K}$ dans une échelle de températures situées entre 273 K et 293 K. Avec cette valeur, nous obtenons une création d'entropie de

$$\sigma = 5 \cdot 10^{-3}\,\text{W/m}^2\text{K} \ . \tag{92}$$

Pouvez-vous comparer la quantité d'entropie qui est produite dans le courant avec celle qui est transportée ? En comparaison, un excellent duvet en plumes d'oie possède une valeur $\kappa = 1{,}5\,\text{W/m}^2\text{K}$, laquelle est également appelée 15 tog dans les magasins*.

Défi 479 pe

Il existe deux autres manières, excepté la conduction de chaleur, pour transporter de l'entropie : la *convection*, utilisée par les appareils de chauffage domestiques, et le *rayonnement*, qui est possible uniquement à travers un espace vide. Par exemple, la Terre rayonne environ $1{,}2\,\text{W/m}^2\text{K}$ dans l'espace, soit au total environ 0,51 PW/K. L'entropie est (presque) identique à celle que la Terre reçoit du Soleil. Si une quantité plus importante d'entropie devait être rayonnée au loin par rapport à celle reçue, la température

* Cette unité n'est pas plus ridicule que celle officielle BthU · h/sqft/cm/°F (ce n'est pas une blague) utilisée dans quelques provinces éloignées de notre galaxie.

La puissance d'isolation des matériaux est habituellement mesurée par la constante $\lambda = \kappa d$ qui est indépendante de l'épaisseur d de la couche isolante. Des valeurs relevées dans la nature s'échelonnent de 2 000 W/K m environ pour le diamant, qui est le meilleur conducteur de tous, à la valeur minuscule de $5 \cdot 10^{-3}$ W/K m pour le gaz krypton, en passant par des valeurs comprises entre 0,1 W/K m et 0,2 W/K m pour le bois, entre 0,015 W/K m et 0,05 W/K m pour la laine, le liège et la mousse.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

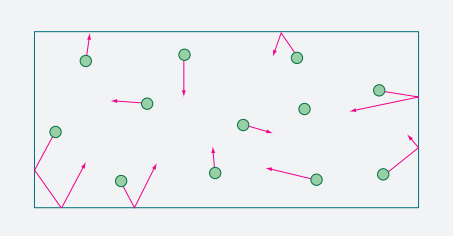


FIGURE 131 L'idée fondamentale de la mécanique statistique, concernant les gaz.

FIGURE 132 Daniel Bernoulli.

de la surface de la Terre devrait augmenter. C'est ce qui est appelé l'*effet de serre*. (Il est aussi nommé *réchauffement global*.) Espérons qu'il restera insignifiant dans les années à venir.

Les systèmes isolés existent-ils ?

Jusqu'à présent, dans toute notre discussion nous avons supposé que nous pouvions distinguer le système en observation de son environnement. Mais de tels systèmes *isolés* ou *fermés*, c'est-à-dire des systèmes qui n'interagissent pas avec leur environnement, existent-ils réellement ? Notre propre existence humaine fut vraisemblablement le modèle originel de ce concept : nous ressentons la possibilité d'agir indépendamment de notre environnement. Un système isolé peut être simplement défini comme étant un système qui n'échange aucune énergie ou matière avec son milieu environnant. Durant de nombreux siècles, les scientifiques ne virent aucune raison de contester cette définition.

La notion de système isolé dut être clarifiée dans une certaine mesure avec l'avènement de la mécanique quantique. Néanmoins, cette notion fournit encore des descriptions utiles et précises de la nature dans ce domaine. Ce ne sera que dans la troisième partie de notre promenade qu'elle changera du tout au tout. Auparavant, la question de savoir si l'univers est un système isolé nous conduira à des résultats surprenants. (Qu'en pensez-vous* ?) Nous aborderons bientôt la première étape vers cette réponse.

Défi 480 s

Pourquoi les ballons ont-ils besoin d'espace ? – La fin de la continuité

Les propriétés de la chaleur dépendent du matériau. Leur étude devrait donc nous permettre de comprendre quelque chose concernant les constituants de la matière. Mainte-

* Une suggestion bizarre : votre réponse est presque certainement fausse.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

nant, de toutes les substances, les plus simples sont les gaz*. Les gaz ont besoin d'espace : une certaine quantité de gaz possède une pression et un volume. En fait, il ne fallut pas beaucoup de temps pour montrer que les gaz *ne peuvent pas* être continus. Un des premiers scientifiques à imaginer les gaz comme étant constitués d'atomes fut Daniel Bernoulli**. Bernoulli argumenta que, si les atomes sont des petites particules dotées d'une masse et d'une quantité de mouvement, il devrait être capable de réaliser des prédictions quantitatives sur le comportement des gaz et de les vérifier grâce à l'expérience. Si les particules voltigent partout dans un gaz, alors la *pression* d'un gaz dans un récipient est produite par le flux régulier de particules frappant les parois. Il était alors facile de conclure que, si les particules sont supposées se comporter comme des minuscules billes dures et parfaitement élastiques, la pression p, le volume V et la température T doivent
Défi 481 pe être reliés par l'égalité

$$pV = \frac{3k}{2}NT \tag{93}$$

où N est le nombre de particules contenues dans le gaz. (La constante de Boltzmann k, une des constantes fondamentales de la nature, est définie ci-dessous.) Un gaz constitué de particules ayant un tel comportement théorique est appelé un *gaz parfait*. La relation (93) a été vérifiée par des expériences à température ambiante et d'autres à température plus élevée, pour tous les gaz connus.

Bernoulli dériva ainsi cette relation pour les gaz, avec une prédiction particulière pour la constante de proportionnalité, à partir de l'unique hypothèse que les gaz sont constitués de petits composants massifs. Cette dérivation fournit un argument décisif en faveur de l'existence des atomes et de leur comportement similaire à celui d'objets ordinaires, bien que minuscules. (Pouvez-vous imaginer comment N pourrait être déterminé expé-
Défi 482 pe rimentalement ?)

Le modèle du gaz parfait nous permet de répondre à des questions telles que celle illustrée dans la Figure 133. Deux ballons de baudruche *identiques*, dont l'un est plus gonflé que l'autre, sont reliés via un tuyau et une valve. La valve est ouverte. Lequel des
Défi 483 s deux se dégonfle ?

La relation des gaz parfaits établit que des gaz plus chauds, à une pression donnée, requièrent plus de volume. Cette relation explique donc pourquoi les vents et les orages
Défi 484 e existent, pourquoi les ballons emplis d'air chaud s'élèvent, pourquoi les moteurs à explosion fonctionnent, pourquoi la couche d'ozone est détruite par certains gaz, ou pourquoi,

* Par ailleurs, le mot *gaz* est une construction moderne. Il fut inventé par l'alchimiste et physicien bruxellois Johan Baptista van Helmont (1579–1644), de façon à avoir une consonance similaire à « chaos ». C'est un de ces rares mots qui ont été inventés par une seule personne puis adoptés par la suite partout dans le monde.

** Daniel Bernoulli (n. Groningue 1700, d. Bâle 1782), fut un important mathématicien et physicien suisse. Son père Johann et son oncle Jakob étaient des mathématiciens célèbres, comme l'étaient ses frères et certains de ses neveux. Daniel Bernoulli publia beaucoup de résultats mathématiques et physiques. En physique, il étudia la décomposition du mouvement complexe en translation et en rotation. En 1738 il publia l'*Hydrodynamique*, dans lequel il déduisit tous les résultats à partir d'un unique principe, à savoir la conservation de l'énergie. Le *principe de Bernoulli*, ainsi nommé, établit pourquoi (et comment) la pression d'un fluide décroît lorsque sa vitesse augmente. Il étudia les marées et de nombreux problèmes mécaniques complexes, et interpréta la « loi » de Boyle–Mariotte pour les gaz. Pour la publication de ses travaux il obtint le prestigieux prix de l'Académie française des sciences – un précurseur du prix Nobel – à dix reprises.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

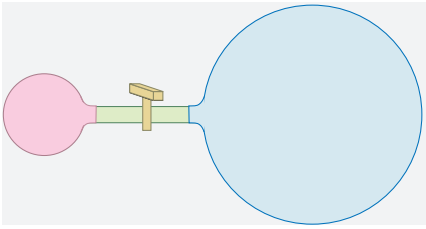


FIGURE 133 Quel ballon gagne ?

pendant l'été extrêmement chaud de 2001 dans le sud de la Turquie, les masques à oxygène étaient nécessaires pour se promener dehors en milieu de journée.

Maintenant vous pouvez relever le défi suivant : comment pouvez-vous mesurer le
Défi 485 s poids d'une voiture ou d'un vélo uniquement avec une règle ?

La métaphore des gaz, comme étant constitués d'éléments durs sans aucune interaction à longue distance, s'écroule à des températures très basses. Pourtant, la relation du gaz parfait (93) peut être améliorée pour surmonter ces embûches grâce à la prise en compte des variations dues aux interactions entre les atomes ou les molécules. Cette
Réf. 201 approche est aujourd'hui de pratique courante et nous permet de mesurer des températures, même à des valeurs extrêmement basses. Les effets observés en dessous de 80 K, tels que la solidification de l'air, la circulation du courant électrique sans aucun frotte-
Réf. 202 ment, ou l'écoulement des liquides sans frottement, forment à eux seuls un domaine fascinant : le monde captivant de la physique des basses températures. Elle sera explorée
Page ??, page ?? plus loin.

Mouvement brownien

Il est facile d'observer, sous un microscope, que des petites particules (comme du pollen) dans un liquide ne restent jamais au repos. Elles semblent suivre un mouvement en zigzag aléatoire. En 1827, le botaniste anglais Robert Brown (1773–1858) montra à l'aide d'une série d'expériences que cette observation est indépendante du type de particule et du type de liquide utilisé. En d'autres termes, Brown avait découvert un bruit fondamental dans la nature. Autour de 1860, ce mouvement était attribué aux molécules du liquide qui heurtent les particules. En 1905 et 1906, Marian von Smoluchowski et, indé-
Réf. 203 pendamment, Albert Einstein argumentèrent que cette théorie pouvait être testée expérimentalement, bien qu'à cette époque personne ne fût capable d'observer directement les molécules. Ce test tire profit des propriétés spécifiques du bruit thermique.

Il était déjà clair depuis longtemps que si les molécules, c'est-à-dire les particules indivisibles de matière, existaient réellement, alors la chaleur devait être un mouvement désordonné de ces constituants et la température devait être l'énergie moyenne par degré de liberté de ces éléments. Le modèle de Bernoulli de la Figure 131 suggère que, pour
Défi 486 pe des gaz monoatomiques, l'énergie cinétique T_{cin} pour une particule est donnée par

$$T_{\text{cin}} = \frac{3}{2} kT \tag{94}$$

où T représente la température. La *constante de Boltzmann* déjà citée $k = 1{,}4 \cdot 10^{-23}\,\text{J/K}$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

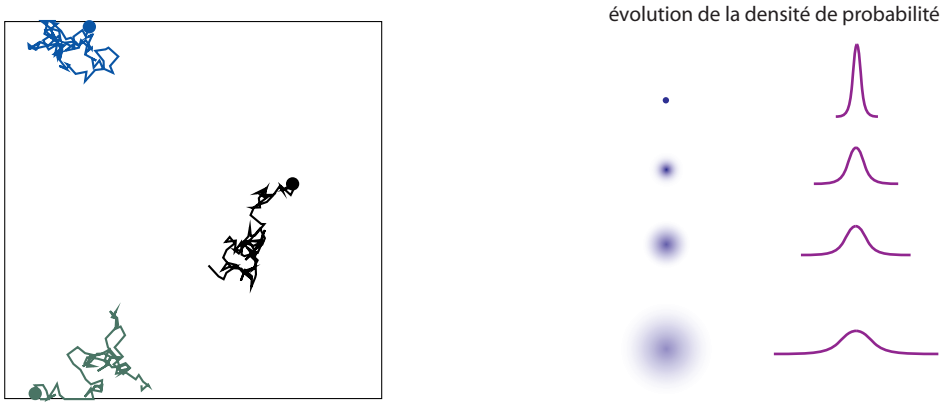


FIGURE 134 Exemples de trajectoires pour des particules en mouvement brownien et leur distribution de déplacements.

représente le facteur de conversion standard entre la température et l'énergie*. À la température ambiante de 293 K, l'énergie cinétique est ainsi de 6 zJ.

Si l'on utilise la relation (94) pour calculer la vitesse des molécules de l'air à tempé-
Défi 487 pe rature ambiante, on aboutit à des valeurs de plusieurs centaines de mètres par seconde. Alors pourquoi la fumée issue d'une flamme met-elle si longtemps à se diffuser à travers une pièce ? Rudolph Clausius (1822–1888) répondit à cette question au milieu du dix-neuvième siècle : la diffusion est ralentie par les multiples collisions avec les molécules de l'air, de la même manière que les particules de pollen heurtent les molécules du liquide.

À première vue, nous pourrions stipuler que la distance moyenne que la particule de pollen a parcourue après n collisions devrait être nulle, parce que les vitesses des molécules sont aléatoires. Cependant, c'est faux, comme le montre l'expérience.

Nous pouvons observer la moyenne du *carré* d'un déplacement, noté $\langle d^2 \rangle$, pour la particule de pollen. Nous ne pouvons pas prédire dans quelle direction la particule se déplacera, mais nous savons qu'elle se déplace. Si la distance que la particule parcourt après une collision est l, la moyenne du carré du déplacement après n collisions est don-
Défi 488 pe née, comme vous devriez être capable de le montrer par vous-même, par

$$\langle d^2 \rangle = nl^2 \,. \tag{95}$$

Pour des molécules ayant une vitesse moyenne v au cours d'un temps t ceci donne

$$\langle d^2 \rangle = nl^2 = vlt \,. \tag{96}$$

* L'important physicien autrichien Ludwig Boltzmann (n. Vienne 1844, d. Duino 1906) est très célèbre pour ses travaux sur la thermodynamique, pour laquelle il interpréta tous les phénomènes thermodynamiques et les observables, y compris l'entropie, comme des conséquences du comportement des molécules. Planck baptisa la constante de Boltzmann en l'honneur de ses recherches. Il fut l'un des plus importants physiciens de la fin du dix-neuvième siècle et le précurseur de nombreux développements qui conduisirent à la théorie quantique. On dit que Boltzmann s'est suicidé en partie à cause de la réticence de la communauté scientifique à reconnaître ses idées. De nos jours, son œuvre constitue toujours le savoir de référence inculqué par les manuels.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 33 Quelques valeurs caractéristiques d'entropie par particule à température et pression *standards* comme multiples de la constante de Boltzmann.

MATIÈRE	ENTROPIE PAR PARTICULE
Solides monoatomiques	0,3 k à 10 k
Diamant	0,29 k
Graphite	0,68 k
Plomb	7,79 k
Gaz monoatomiques	15-25 k
Hélium	15,2 k
Radon	21,2 k
Gaz diatomiques	15 k à 30 k
Solides polyatomiques	10 k à 60 k
Liquides polyatomiques	10 k à 80 k
Gaz polyatomiques	20 k à 60 k
Eicosane	112 k

En d'autres termes, la moyenne du carré du déplacement augmente proportionnellement avec le temps. Bien sûr, ce n'est vrai que si le liquide est constitué de molécules séparées. En mesurant à plusieurs reprises la position d'une particule, on devrait obtenir la distribution indiquée dans la Figure 134 pour la probabilité que la particule soit repérée à une distance donnée du point de départ. Celle-ci est appelée la *loi normale* (ou *distribution gaussienne*). En 1908, Jean Perrin* réalisa de vastes expériences dans le but de tester cette prédiction. Il trouva que l'équation (96) décrivait exactement les observations consignées, persuadant ainsi quiconque que le mouvement brownien est en réalité dû aux collisions avec les molécules du liquide environnant, comme Smoluchowski et Einstein l'avaient suggéré**. Perrin reçu le prix Nobel de physique de 1926 pour ces expériences.

Réf. 204

Einstein montra également que la même expérience pouvait être utilisée pour déterminer le nombre de molécules contenues dans un litre d'eau (ou, de manière équivalente, la constante de Boltzmann k). Pouvez-vous développer la manière dont il s'y prit ?

Défi 489 d

ENTROPIE ET PARTICULES

Une fois qu'il fut clair que la chaleur et la température sont dues au mouvement de particules microscopiques, les gens se demandèrent ce que l'entropie *représente* au niveau

* Jean Perrin (1870–1942), important physicien français, consacra la majeure partie de sa carrière à la recherche de la preuve expérimentale de l'hypothèse atomique et à la détermination du nombre d'Avogadro. Dans sa quête, il perfectionna l'usage des émulsions, du mouvement brownien et des films d'huile. Son discours de prix Nobel (http://nobelprize.org/physics/laureates/1926/perrin-lecture.html) relate l'histoire captivante de sa recherche. Il rédigea le livre incontournable *Les atomes* et fonda le Centre national de la recherche scientifique. Il était également le premier à postuler, en 1901, qu'un atome est similaire à un système solaire tout entier.

** Dans une ravissante démonstration expérimentale, Pierre Gaspard et son équipe montrèrent en 1998 que le mouvement brownien est également chaotique, au strict sens physique qui sera donné plus tard.

Page 265 Réf. 205

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

microscopique. La réponse peut être formulée de plusieurs manières. Les deux réponses les plus radicales sont :

— L'entropie est le nombre attendu de questions à oui ou non, multiplié par k ln 2, dont les réponses nous renseigneraient complètement sur la description du système, c'est-à-dire sur son état microscopique.
— L'entropie mesure le (logarithme du) nombre W d'états microscopiques possibles. Un état macroscopique donné peut avoir de nombreuses réalisations microscopiques. Le logarithme de ce nombre, multiplié par la constante de Boltzmann k, donne l'entropie*.

En résumé, plus l'entropie est élevée, plus il y a de micro-états possibles. À travers l'une ou l'autre de ces définitions, l'entropie mesure la quantité de hasard dans un système. En d'autres termes, elle mesure la transformabilité de l'énergie : une entropie plus élevée signifie que la transformabilité est moins importante. D'autre part, l'entropie quantifie la *liberté* dans le choix du micro-état qu'un système possède. Une forte entropie signifie un haut degré de liberté dans le choix du micro-état. Par exemple, quand une molécule de glucose (une sorte de sucre) est produite par la photosynthèse, environ 40 bits d'entropie sont libérés. Cela signifie qu'après que le glucose s'est formé 40 questions supplémentaires à oui ou non doivent trouver une réponse afin de déterminer l'état microscopique complet du système. Les physiciens utilisent fréquemment une unité macroscopique, la plupart des systèmes intéressants sont vastes, et donc une entropie de 10^{23} bits est notée 1 J/K**.

Réf. 206 Pour résumer, l'entropie est donc une mesure particulière qui permet de quantifier le désordre dans des systèmes thermiques. Trois points méritent d'être soulignés. En premier lieu, l'entropie n'est pas *la* mesure du désordre, mais *une* mesure du désordre. Il est par conséquent *incorrect* d'utiliser l'entropie comme un *synonyme* du concept de désordre, comme il est souvent évoqué dans la littérature populaire. L'entropie n'est définie que pour des systèmes qui ont une température, en d'autres termes, uniquement pour des systèmes qui sont en équilibre ou proches de l'équilibre. (Pour des systèmes loin de l'équilibre, aucune mesure de désordre n'a été trouvée jusqu'à présent, peut-être parce qu'aucune d'entre elles n'est possible.) En fait, l'utilisation du terme entropie a tellement dégénéré que parfois nous sommes obligés de parler de l'entropie *thermodynamique* pour être plus clairs.

En second lieu, l'entropie est reliée à l'information *seulement si* l'information est aussi définie comme étant $-k \ln W$. Pour éclaircir ce point, prenez un livre d'une masse d'un kilogramme. À température ambiante, son contenu en entropie est d'environ 4 kJ/K. L'information imprimée à l'intérieur d'un livre, disons de 500 pages de 40 lignes ayant chacune 80 caractères parmi 64 possibilités, correspond à une entropie de $4 \cdot 10^{-17}$ J/K. En bref, ce qui est habituellement appelé « information » dans notre vie quotidienne représente une fraction négligeable de ce qu'un physicien nomme information. L'entropie est définie en utilisant le concept *physique* de l'information.

* Lorsque Max Planck se rendit en Autriche pour rechercher la tombe anonyme de Boltzmann dans le but de l'inhumer dans une tombe convenable, il inscrivit la formule $S = k \ln W$ sur la pierre tombale. (Quel physicien aurait, de nos jours, les moyens de financer la tombe d'un autre ?)

Défi 490 pe ** Ce n'est qu'approximativement vrai. Pouvez-vous trouver la valeur exacte ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Finalement, l'entropie n'est *pas* non plus une mesure de ce qui est appelé la *complexité* d'une situation dans la vie ordinaire. En réalité, personne n'a encore trouvé une quantité décrivant cette notion quotidienne. Cette tâche est étonnamment difficile. Essayez !

Réf. 207
Défi 491 pe

En résumé, si vous entendez le mot entropie utilisé avec une signification différente de $S = k \ln W$, méfiez-vous : quelqu'un est en train de vous rouler, probablement avec quelques idéologies.

L'ENTROPIE MINIMALE DE LA NATURE – LE QUANTUM D'INFORMATION

Avant que nous achevions complètement notre discussion sur la thermostatique, nous devons mettre le doigt d'une autre manière sur l'importance de la constante de Boltzmann k. Nous avons vu que cette constante apparaît à chaque fois que la granularité de la matière joue un rôle ; elle exprime le fait que la matière est constituée de petites entités élémentaires. La manière la plus saisissante de formuler cette vérité est la suivante : *il existe une entropie minimale dans la nature*. En réalité, pour tous les systèmes, l'entropie vérifie

$$S \geqslant \frac{k}{2} \,. \tag{97}$$

Ce résultat est vieux de presque 100 ans, il fut exprimé plus clairement (avec un facteur numérique différent) par le physicien hongro-allemand Leo Szilard. La même remarque fut soulevée par le physicien français Léon Brillouin (encore une fois avec un facteur numérique différent). Cette assertion peut également être prise pour la *définition* de la constante de Boltzmann.

Réf. 208

Réf. 209

L'existence d'une entropie minimale dans la nature est une idée profonde. Elle élimine la possibilité de la continuité de la matière et aussi celle de sa « fractalité ». Une entropie minimale implique que la matière est constituée d'un nombre fini de petits éléments. La limite de l'entropie exprime l'idée que la matière est faite de particules*. La limite de l'entropie montre également que la physique galiléenne ne peut pas être correcte : la physique galiléenne suppose que des quantités arbitrairement petites doivent exister. L'entropie limite est la première des diverses limites du mouvement que nous rencontrerons jusqu'à ce que nous achevions la seconde partie de notre ascension. Dès que nous aurons découvert toutes les limites, nous pourrons démarrer la troisième et dernière partie, qui conduit à l'unification.

La présence d'une quantité minimale suggère l'existence d'une limite sur la précision des mesures. Les mesures ne peuvent pas avoir une précision infinie. Cette limitation est généralement exprimée sous la forme d'une relation d'incertitude. En réalité, l'existence d'une entropie minimale peut être reformulée comme une relation d'incertitude entre la température T et l'énergie interne U d'un système :

$$\Delta \frac{1}{T} \, \Delta U \geqslant \frac{k}{2} \,. \tag{98}$$

* L'entropie minimale laisse sous-entendre que la matière est constituée de minuscules sphères. L'*action* minimale, que nous rencontrerons dans la théorie quantique, suggère implicitement que ces sphères sont en réalité des nuages miniatures.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 210 Cette relation* fut exprimée par Niels Bohr et fut discutée par Werner Heisenberg, qui
Page ?? la catalogua comme l'un des principes d'incertitude fondamentaux de la nature. La constante de Boltzmann (divisée par 2) cristallise ainsi la valeur de la plus petite entropie
Réf. 212 possible dans la nature. Pour cette raison, Gilles Cohen-Tannoudji la qualifie de *quantum*
Réf. 209 *d'information* et Herbert Zimmermann la dénomme le *quantum d'entropie*.

L'expression (98) lève le voile sur une idée encore plus générale. Pour chaque valeur minimale attribuable à une observable, il existe un principe d'incertitude associé. Nous soulignerons plusieurs fois cette remarque durant le reste de notre aventure, et de façon la plus importante lorsque nous aborderons le quantum d'action et le principe d'incer-
Page ?? titude de Heisenberg.

La mise en évidence d'une entropie minimale possède de nombreuses conséquences. En tout premier lieu, elle met en lumière le troisième principe de la thermodynamique. Une entropie minimale implique que le zéro absolu de la température ne peut être atteint. Deuxièmement, une entropie minimale explique pourquoi les valeurs d'entropie sont finies et non pas infinies. Troisièmement, elle détermine la valeur absolue de l'entropie pour chaque système. En physique des milieux continus, l'entropie, comme l'énergie, n'est définie qu'à une constante additive près. La limite de l'entropie remédie à tous ces problèmes.

L'existence d'une valeur minimale pour une observable signifie qu'un principe d'incertitude existe entre deux quantités quelconques dont le produit donne cette observable. Par exemple, le taux de production d'entropie et le temps forment une telle paire. En réalité, un principe d'incertitude relie le taux de production d'entropie $P = \mathrm{d}S/\mathrm{d}t$ et le temps t :

$$\Delta P \, \Delta t \geqslant \frac{k}{2} \,. \tag{99}$$

À partir de celui-ci et de la relation antérieure (98) il est possible de déduire tous les résultats de la physique statistique, c'est-à-dire la théorie précise de la thermostatique
Réf. 212, Réf. 211 et de la thermodynamique. Nous n'explorerons pas davantage celle-ci ici. (Pouvez-vous
Défi 492 pe montrer que le principe zéro découle de l'existence d'une entropie minimale ?) Nous nous restreindrons à l'une des pierres angulaires de la thermodynamique : le deuxième principe.

Pourquoi ne pouvons-nous pas nous souvenir du futur ?

> « Une mémoire qui n'opère que dans le passé n'a rien de bien fameux, déclara la Reine. »
> Lewis Carroll, *Alice au pays des merveilles – De l'autre côté du miroir*

Page 32 Auparavant, lorsque nous avons discuté du temps, nous ignorions la différence entre le passé et le futur. Mais manifestement une différence existe, puisque nous n'avons pas la faculté de nous remémorer le futur. Ce n'est pas une restriction due uniquement à notre cerveau. Tous les appareils que nous avons inventés, tels que les magnétophones, les appareils photographiques, les journaux et les livres, nous transmettent des informations uniquement sur le passé. Existe-t-il une manière de concevoir un caméscope doté d'un

Réf. 211 * Il apparaît que la valeur historique du terme de droite, donné par k, doit être rectifiée par $k/2$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

bouton « futur » ? Une telle fonction aurait à résoudre un sérieux problème : comment
Défi 493 pe distinguerait-elle le futur proche du futur éloigné ? Il n'y a pas besoin de réfléchir énormément pour s'apercevoir que n'importe quelle façon de la mettre en œuvre entrerait en conflit direct avec le second principe de la thermodynamique. C'est un manque de chance, car nous aurions précisément besoin de ce dispositif pour prouver qu'il existe
Défi 494 pe un mouvement plus rapide que la lumière. Pouvez-vous découvrir ce rapport ?

En résumé, le futur ne peut pas être connu à l'avance parce que des systèmes isolés tendent toujours vers un état d'entropie maximale. Dit encore plus simplement, la mémoire existe car le cerveau est fait de nombreuses particules, et donc le cerveau en est réduit au passé*. Cependant, pour les types de mouvement les plus simples, dans lesquels quelques particules seulement sont impliquées, la différence entre le passé et le futur s'évanouit. Pour des systèmes dotés d'un petit nombre de particules, il n'y a aucune distinction entre des temps qui s'éloignent et des temps qui s'approchent de l'instant présent. Nous pouvons dire que le futur diffère du passé uniquement dans notre cerveau, ou, de manière équivalente, uniquement à cause du frottement. Par conséquent, la différence entre le passé et le futur n'est pas souvent évoquée dans cette promenade, bien qu'elle représente une partie essentielle de notre expérience humaine. Mais tout le plaisir de cette présente aventure est justement de pouvoir dépasser nos limites.

Est-ce que tout est fait de particules ?

> « Un physicien est la réalisation des atomes pour comprendre les atomes. »
>
> George Wald

Réf. 213

Historiquement, l'étude de la mécanique statistique a été d'une importance cruciale pour la physique. Elle a fourni la première démonstration que des objets physiques sont constitués de particules en interaction. L'histoire de ce domaine représente en fait une longue chaîne de découvertes montrant que toutes les propriétés que nous attribuons aux objets, comme la taille, la rigidité, la couleur, la masse volumique, le magnétisme, la conductivité électrique ou thermique, sont issues des interactions entre les nombreuses particules dont ils sont composés. La révélation que *tous les objets sont constitués de particules en interaction* a souvent été citée comme étant la principale découverte de la science moderne.

Page 248 Comment cette découverte fut-elle réalisée ? Le Tableau 30 listait les principales quantités étendues utilisées en physique. Les quantités étendues sont capables de s'écouler. Il apparaît que tous les écoulements dans la nature sont *composés* de processus élémentaires, comme indiqué dans le Tableau 34. Nous avons vu que les flux de masse, de volume, de charge, d'entropie et de substance sont composés. Plus tard, la théorie quantique montrera la même chose à propos du flux de la quantité de mouvement et du moment cinétique. *Tous les écoulements sont constitués de particules.*

Le succès de cette idée a incité beaucoup de gens à la généraliser jusqu'à cette déclaration : « Tout ce que nous observons est constitué de parties. » Cette approche a été
Réf. 214 appliquée avec succès à la chimie avec les molécules, aux sciences des matériaux et à la

* Ou, dit encore autrement, le cerveau est « obligé » d'évoluer d'un état d'entropie donnée vers un état de plus forte entropie [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 34 Quelques valeurs minimales de flux relevées dans la nature.

Observation	Valeur minimale
Flux de matière	une molécule, un atome ou une particule
Flux volumique	une molécule, un atome ou une particule
Flux de quantité de mouvement	constante de Planck divisée par la longueur d'onde
Flux de moment cinétique	constante de Planck
Quantité chimique d'une substance	une molécule, un atome ou une particule
Flux d'entropie	entropie minimale
Flux de charge	charge élémentaire
Flux de lumière	constante de Planck divisée par la longueur d'onde

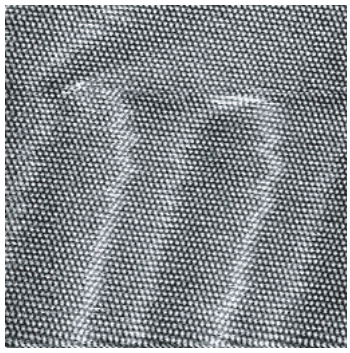


FIGURE 135 Une surface d'un unique cristal d'or (111), chaque point lumineux étant un atome, avec un déboîtement de sa surface. (© CNRS)

géologie avec les cristaux, à l'électricité avec les électrons, aux atomes avec les particules élémentaires, à l'espace avec les points, au temps avec les instants, à la lumière avec les photons, à la biologie avec les cellules, à la génétique avec les gènes, à la neurologie avec les neurones, aux mathématiques avec les ensembles et les relations, à la logique avec les propositions élémentaires, et même à la linguistique avec les morphèmes et les phonèmes. Toutes ces sciences se sont développées sur l'idée que tout est constitué de *parties* en relation. Cette idée élémentaire est si évidente en soi que nous éprouvons beaucoup de difficulté à en formuler une alternative. Essayez seulement !

Défi 495 pe

Toutefois, dans le cas de la nature *tout* entière, l'idée que celle-ci soit une somme de parties en relation est inexacte. Elle s'avère être seulement un préjugé, et un préjugé si enraciné qu'il retarda des évolutions postérieures en physique dans les dernières décennies du vingtième siècle. En particulier, elle *ne* s'applique *pas* aux particules élémentaires ou à l'espace-temps. La révélation de la véritable description de la totalité de la nature est le défi le plus redoutable et le plus passionnant de notre aventure, car il nécessite un renversement complet de nos habitudes de réflexion. Ce sujet renferme énormément de surprises ludiques.

Page ??

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

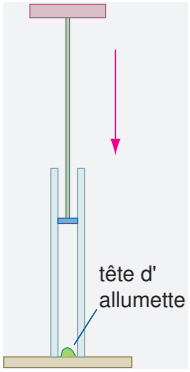


FIGURE 136 La pompe à combustion.

> « Jede Aussage über Komplexe läßt sich in eine Aussage über deren Bestandteile und in diejenigen Sätze zerlegen, welche die Komplexe vollständig beschreiben*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 2.0201

POURQUOI LES PIERRES NE PEUVENT ÊTRE NI CONTINUES NI FRACTALES, NI FAITES DE PETITES BILLES DURES

L'exploration de la température produit un autre résultat intéressant. Les chercheurs étudièrent d'abord les gaz, et mesurèrent quelle quantité d'énergie était nécessaire pour les réchauffer de 1 K. Le résultat est étonnamment simple : tous les gaz se partagent seulement quelques valeurs, lorsque le nombre de molécules N est pris en considération. Les gaz monoatomiques (situés dans un récipient à un volume constant) nécessitent une énergie de $3Nk/2$, les gaz diatomiques (et ceux qui possèdent une molécule linéaire) $5Nk/2$, et la majorité des autres gaz $3Nk$, où $k = 1{,}4 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann.

Page 260

L'explication de cette constatation allait bientôt poindre : chaque degré de liberté thermodynamique** contribue à une énergie de $kT/2$ sur l'énergie totale, où T représente la température. Donc le nombre de degrés de liberté dans les corps physiques est fini. Les corps ne sont pas continus, ils ne sont pas fractals non plus : s'ils l'étaient, leur énergie thermique spécifique*** serait infinie. La matière est donc en réalité constituée de petites entités élémentaires.

Tous les degrés de liberté contribuent à l'énergie thermique spécifique. Du moins, c'est ce que les physiciens classiques prédisent. Les solides, comme les pierres, possèdent 6 degrés de liberté thermodynamiques et devraient comporter une énergie thermique spécifique de $3Nk$. À haute température, c'est ce qui est réellement observé. Mais les

* « Tout énoncé portant sur des complexes se laisse analyser en un énoncé sur leurs éléments et en propositions telles qu'elles décrivent complètement ces complexes. »

** Un *degré de liberté thermodynamique* est, pour chaque particule d'un système, le nombre de dimensions dans lesquelles elle peut se déplacer plus le nombre de dimensions dans lesquelles elle est retenue dans un potentiel. Des atomes dans un solide en ont six, des particules dans des gaz monoatomiques n'en ont que trois, des particules dans des gaz diatomiques ou des molécules linéaires rigides en ont cinq. Le nombre de degrés de liberté des molécules plus grandes dépend de leur forme.

Réf. 215

*** Qui représente la quantité d'énergie thermique par unité de masse [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mesures effectuées sur les solides à température ambiante produisent des valeurs plus basses, et, plus la température est basse, plus la valeur devient petite. Même les gaz indiquent des valeurs inférieures à celles mentionnées ci-dessus lorsque la température est suffisamment basse. En d'autres termes, les molécules et les atomes se comportent différemment à des énergies très basses : les atomes ne sont pas des petites billes dures inchangeables. La variation de ces valeurs constitue l'un des premiers indices vers l'avènement de la théorie quantique.

Curiosités et défis amusants sur la chaleur

La compression de l'air accroît sa température, ce qui est indiqué directement par la pompe à combustion, une variante de la pompe à vélo, représentée sur la Figure 136. (Pour voir un exemplaire en fonctionnement, consultez le site http://www.tn.tudelft.nl/cdd.) Une tête d'allumette au fond d'une pompe à air faite d'un matériau transparent est facilement enflammée par la compression de l'air au-dessus d'elle. La température de l'air après la compression est si élevée que le bout de l'allumette s'enflamme spontanément.

* *

Si la chaleur est véritablement un mouvement désordonné d'atomes, un énorme problème surgit. Lorsque deux atomes se frappent de plein fouet, à l'instant où leur distance est la plus petite, ils ont une vitesse nulle. Où l'énergie cinétique part-elle ? Certes, elle est transformée en énergie potentielle. Mais cela implique alors que les atomes peuvent être déformés, qu'ils possèdent une structure interne, qu'ils sont constitués de parties, et qu'ils peuvent donc en principe être brisés. En bref, si la chaleur est un mouvement atomique désordonné, *les atomes ne sont pas indivisibles* ! Au dix-neuvième siècle, cet argument fut avancé pour montrer que la chaleur ne peut pas être un mouvement atomique, mais doit être une certaine espèce de fluide. Mais puisque nous tenons pour certain que la chaleur est réellement de l'énergie cinétique, les atomes doivent en réalité être divisibles, bien que leur nom signifie « indivisible ». Nous n'avons pas besoin de mener une expérience onéreuse pour le montrer.

* *

Réf. 216 En 1912, Émile Borel remarqua que, si un gramme de matière était déplacé d'un centimètre sur Sirius, cela modifierait le champ gravitationnel de la Terre d'une quantité minuscule. Ce changement infinitésimal serait suffisant pour rendre la trajectoire des molécules dans un gaz impossible à calculer au bout d'une fraction de seconde.

* *

Non seulement les gaz, mais également la plupart des autres matériaux voient leur volume augmenter lorsque la température s'élève. En conséquence, les câbles électriques
Défi 496 s supportés par les pylônes pendent beaucoup plus bas en été qu'en hiver. Est-ce vrai ?

* *

Réf. 217 Ce qui suit est un célèbre problème dû à Fermi. Étant donné qu'un cadavre humain se refroidit en quatre heures après le décès, quel est le nombre minimal de calories nécessaires

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

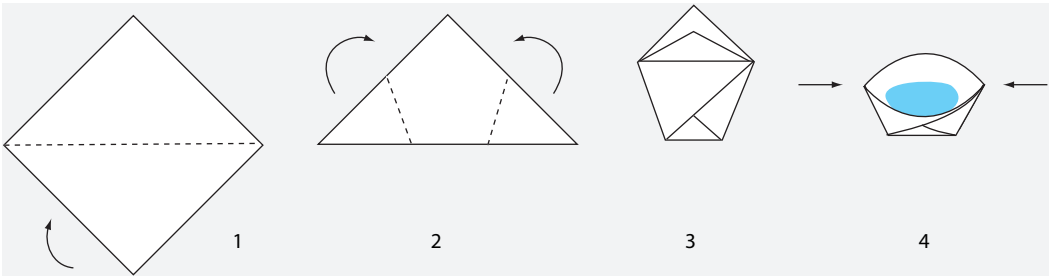


FIGURE 137 Pouvez-vous faire bouillir de l'eau dans cette tasse en papier ?

Défi 497 pe par jour dans notre alimentation ?

* *

L'énergie contenue dans le mouvement thermique n'est pas insignifiante. Une balle de fusil de 1 g voyageant à la vitesse du son possède une énergie cinétique d'uniquement 0,01 kcal.

* *

Défi 498 s Comment un ballon d'air chaud ordinaire de 1 500 m^3 fonctionne-t-il ?

* *

Si vous ne trouvez pas ce texte passionnant, voici une suggestion. Vous pouvez utiliser du papier pour réaliser une tasse, comme indiqué sur la Figure 137, et faire bouillir de l'eau contenue dedans au-dessus d'une flamme. Cependant, pour réussir, vous devez être un
Défi 499 s tant soit peu prudent. Pouvez-vous indiquer de quelle manière ?

* *

Le mélange de 1 kg d'eau à 0 °C et de 1 kg d'eau à 100 °C donne 2 kg d'eau à 50 °C. Quel
Défi 500 pe est le résultat du mélange de 1 kg de *glace* à 0 °C et de 1 kg d'eau à 100 °C ?

* *

Réf. 218 La température de l'air la plus élevée jamais enregistrée dans laquelle un homme a survécu est 127 °C. Cette expérience fut menée en 1775 à Londres par le secrétaire de la Royal Society, Charles Blagden, accompagné de quelques-uns de ses amis, qui demeura dans une pièce à cette température durant 45 minutes. De façon intéressante, le bifteck saignant qu'il avait pris avec lui était cuit (« bien cuit ») quand lui et ses amis quittèrent la pièce. Quelle condition devait être scrupuleusement respectée afin d'empêcher de cuire
Défi 501 s les individus de la même manière que le bifteck ?

* *

Défi 502 s Pourquoi l'eau bout-elle à 99,975 °C au lieu de 100 °C ?

* *

Défi 503 s Pouvez-vous remplir une bouteille avec exactement 1 ± 10^{-30} kg d'eau ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

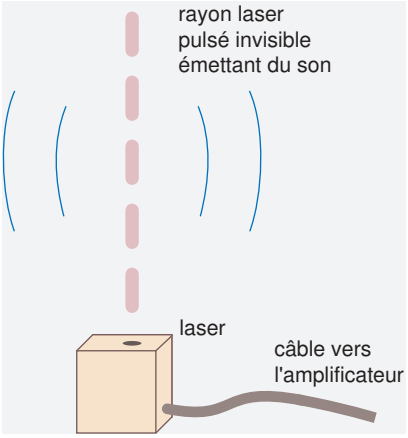


FIGURE 138 Le haut-parleur invisible.

* *

Un gramme de graisse, que ce soit du beurre ou de la graisse humaine, contient 38 kJ d'énergie chimique (ou, en unités anciennes plus familières aux nutritionnistes, 9 kcal). C'est la même valeur que celle de l'essence. Pourquoi les gens et le beurre sont-ils moins dangereux que l'essence ? Défi 504 s

* *

En 1992, le physicien hollandais Martin van der Mark inventa un haut-parleur qui fonctionne en chauffant l'air avec un rayon laser. Il démontra que, avec la bonne longueur d'onde et une modulation convenable de l'intensité, un rayon laser dans l'air peut générer du son. Cet effet à la base de ce dispositif, appelé *effet photoacoustique*, se révèle dans de nombreux matériaux. La meilleure longueur d'onde du laser pour l'air est située dans le domaine de l'infrarouge, sur l'une des quelques lignes d'absorption du spectre de la vapeur d'eau. En d'autres termes, un rayon laser infrarouge correctement modulé qui rayonne à travers l'atmosphère produit du son. Une telle lumière peut être émise à partir d'un petit semi-conducteur à laser de la taille d'une boîte d'allumettes masquée au plafond et dirigée vers le bas. Le son est émis dans toutes les directions perpendiculaires au rayon. Puisque la lumière laser infrarouge n'est pas visible, Martin van der Mark inventa un haut-parleur invisible ! Malheureusement, l'efficacité des modèles actuels reste encore faible, de sorte que la puissance du haut-parleur n'est pas encore suffisante pour des applications pratiques. Les progrès dans la technologie des lasers devraient changer la donne, de telle sorte qu'à l'avenir nous devrions être capables d'entendre des sons qui sont émis depuis le centre d'une pièce apparemment vide.

* *

Une célèbre question d'examen : comment pouvez-vous mesurer la hauteur d'un immeuble à l'aide d'un baromètre, d'une corde et d'une règle ? Découvrez au moins six manières différentes d'y répondre. Défi 505 s

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Quelle est la probabilité approximative que, parmi un million de lancers d'une pièce de
Défi 506 pe monnaie, vous obteniez exactement 500 000 fois pile et autant de fois face ?

Vous aurez certainement besoin de la formule de Stirling $n! \approx \sqrt{2\pi n}(n/e)^n$ pour calculer la réponse*.

* *

Défi 507 s Parler de l'entropie de l'univers a-t-il un sens ?

* *

Défi 508 pe Un ballon gonflé à l'hélium peut-il soulever le réservoir qui a servi à le remplir ?

* *

Tous les processus faisant intervenir du frottement, telles l'osmose, la diffusion, l'évaporation, ou la dégénérescence, sont *lents*. Ils prennent un certain temps caractéristique. Il apparaît que n'importe quel processus (macroscopique) doté d'une échelle de temps est irréversible. Ce n'est pas une véritable surprise : nous savons intuitivement que défaire des choses prend toujours plus de temps que de les faire. C'est une nouvelle fois une manifestation du deuxième principe de la thermodynamique.

* *

Il apparaît que le *stockage* de l'information est possible avec une création d'entropie mi-
Réf. 219 nime. Cependant, l'*effacement* de l'information réclame de l'entropie. C'est la raison principale pour laquelle les ordinateurs, ainsi que les cerveaux, ont besoin de sources d'énergie et de systèmes de refroidissement, même si leurs mécanismes n'avaient, mis à part cela, pas besoin d'énergie.

* *

Lorsque nous mélangeons du rhum chaud avec de l'eau froide, quelle est la proportion entre l'augmentation de l'entropie due au mélange et l'augmentation de l'entropie due
Défi 509 pe à la différence de température ?

* *

Pourquoi n'y a-t-il pas de petits hommes, par exemple d'une taille de 10 mm, comme dans de nombreux contes de fées ? En fait, il n'existe aucun animal à sang chaud de cette
Défi 510 s taille. Pourquoi ?

* *

Éclairer un objet avec un rayon lumineux puis l'éteindre et le rallumer à plusieurs reprises produit du son. Ceci est appelé l'*effet photoacoustique*, et est dû à l'expansion thermique du matériau. En modifiant la fréquence de la lumière, et en mesurant l'intensité du bruit, nous dévoilons un spectre photoacoustique caractéristique du matériau. Cette méthode nous permet de détecter des concentrations gazeuses dans l'air d'une partie pour 10^9. Elle est utilisée, parmi d'autres méthodes, pour étudier les gaz émis par

* Il existe de nombreuses variantes de la formule de Stirling, dont une, élémentaire : $n! \approx \sqrt{(2n+1/3)\pi}(n/e)^n$. Une autre est $\sqrt{2\pi n}(n/e)^n e^{1/(12n+1)} < n! < \sqrt{2\pi n}(n/e)^n e^{1/(12n)}$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

les plantes. Les plantes émettent du méthane, de l'alcool et de l'acétaldéhyde en petites quantités, l'effet photoacoustique peut détecter ces gaz et nous aider à comprendre le processus sous-jacent à leur émission.

* *

Quelle est la probabilité approximative pour que toutes les molécules d'oxygène de l'air
Défi 511 pe quittent une ville donnée pendant quelques minutes, tuant ainsi tous les habitants ?

* *

Si vous versez un litre d'eau dans la mer et que vous le mélangez complètement à travers tous les océans, et qu'alors vous soutirez un litre de ce mélange, quelle quantité des
Défi 512 pe atomes originaux récupérerez-vous ?

* *

Combien de temps resteriez-vous à respirer dans la pièce dans laquelle vous vous trouvez
Défi 513 pe si elle était hermétique ?

* *

Qu'est-ce qui se passe si vous déposez un peu de cendre sur un morceau de sucre et que
Défi 514 pe vous mettez le feu à l'ensemble ? (Attention : c'est dangereux et pas pour les enfants.)

* *

Les calculs sur l'entropie sont souvent étonnants. Pour un système de N particules ayant chacune deux états possibles, il y a $W_{\text{tout}} = 2^N$ états. La configuration la plus probable, avec exactement la moitié des particules dans un état et l'autre moitié dans l'autre état, nous donne $W_{\text{max}} = N!/((N/2)!)^2$. Maintenant, pour un système macroscopique de particules, nous devrions avoir typiquement $N = 10^{24}$. Cela donne $W_{\text{tout}} \gg W_{\text{max}}$; en réalité, le premier est 10^{12} fois plus grand que le second. D'un autre côté, nous trouvons
Défi 515 pe que les 20 premiers chiffres de $\ln W_{\text{tout}}$ et $\ln W_{\text{max}}$ coïncident ! Bien que la configuration avec exactement la moitié des particules dans chaque état soit beaucoup plus rare que le
Défi 516 pe cas général, où ce rapport peut varier, l'entropie se révèle être la même. Pourquoi ?

* *

Si la chaleur est due au mouvement des atomes, nos facultés sensorielles de perception de la chaleur et du froid sont simplement des détecteurs de mouvement. Comment
Défi 517 pe pourraient-elles fonctionner ?

Par ailleurs, les sens de l'odorat et du goût peuvent également être assimilés à des détecteurs de mouvement, puisqu'ils signalent la présence de molécules se baladant dans
Défi 518 pe l'air ou dans des liquides. Êtes-vous d'accord avec cette idée ?

* *

La Lune possède une atmosphère, bien qu'extrêmement ténue, composée de sodium (Na) et de potassium (K). Cette atmosphère a été détectée jusqu'à neuf rayons lunaires à partir de sa surface. Cette atmosphère de la Lune est produite à la surface par le rayonnement ultraviolet issu du Soleil. Pouvez-vous estimer la densité atmosphérique de la
Défi 519 s Lune ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

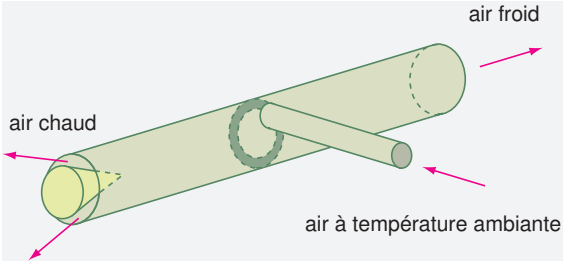


FIGURE 139 Le tube à tourbillons de Wirbelrohr ou de Ranque-Hilsch.

* *

Est-il sensé d'ajouter une ligne au Tableau 30 concernant la quantité d'action physique ? Une colonne ? Pourquoi ?
Défi 520 pe

* *

La diffusion fournit une échelle de longueur. Par exemple, les insectes assimilent l'oxygène à travers leur épiderme. Par conséquent, les parties intérieures de leur corps ne peuvent pas être situées à plus d'un centimètre environ de la surface. Pouvez-vous lister certaines autres échelles de longueur dans la nature sous-tendues par des processus de diffusion ?
Défi 521 s

* *

L'ascension de l'air chaud est la raison pour laquelle de nombreux insectes sont retrouvés dans des nuages en altitude à la tombée de la nuit. Beaucoup d'insectes, particulièrement ceux qui se nourrissent du sang des animaux, sont attirés par l'air chaud et humide.

* *

Les thermomètres fondés sur le mercure peuvent atteindre 750 °C. Comment cela est-il possible, étant donné que le mercure bout à 357 °C ?
Défi 522 s

* *

Défi 523 s À quoi une bougie allumée dans des conditions d'apesanteur ressemble-t-elle ?

* *

Il est possible de construire une centrale électrique en édifiant une grande cheminée, de telle façon que l'air chauffé par le Soleil s'écoule vers le haut dans celle-ci, entraînant une turbine dans son ascension. Il est également possible de réaliser une centrale électrique en mettant en œuvre un long tube vertical, et en y laissant un gaz tel que l'ammoniaque s'élever dans celui-ci, lequel est alors liquéfié au sommet par les températures basses des couches supérieures de l'atmosphère. Quand il retombe dans un second tube comme un liquide – exactement comme la pluie – il entraîne une turbine. Pourquoi de tels projets, qui sont pour la plupart entièrement écologiques, ne sont-ils pas encore utilisés ?
Défi 524 s

* *

Le tube à tourbillons de Ranque-Hilsch ou de *Wirbelrohr* est un des dispositifs les plus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

surprenants jamais inventés. En exhalant, au milieu de celui-ci, de l'air comprimé à température ambiante, deux écoulements d'air se forment à ses extrémités. L'un d'eux est extrêmement froid, pouvant atteindre facilement −50 °C, et l'autre extrêmement chaud, allant jusqu'à 200 °C. Aucune partie mobile et aucun appareil de chauffage ne se trouvent à l'intérieur. Comment fonctionne-t-il ?

Défi 525 s

* *

Il est facile de faire cuire un œuf de telle façon que le blanc soit dur mais que le jaune d'œuf reste liquide. Pouvez-vous accomplir l'inverse ?

Défi 526 s

* *

Les moteurs thermoacoustiques, les pompes et les réfrigérateurs fournissent de nombreuses applications étranges et fascinantes de la chaleur. Par exemple, il est possible de produire un bruit élevé dans des cavités métalliques fermées pour déplacer de la chaleur d'un emplacement froid à un autre chaud. De tels dispositifs possèdent quelques parties mobiles et sont toujours en cours d'étude dans l'espoir de leur trouver des applications pratiques à l'avenir.

Réf. 220

* *

Est-ce qu'un système isolé contenant quelques particules contredit le deuxième principe de la thermodynamique ?

Défi 527 pe

* *

Qu'advient-il de l'entropie lorsque la gravitation est prise en compte ? Nous avons soigneusement mis de côté la gravitation dans notre discussion. En réalité, de nombreux problèmes surgissent – essayez simplement de réfléchir à ce sujet. Par exemple, Jakob Bekenstein a découvert que la matière atteint son entropie la plus élevée possible lorsqu'elle forme un trou noir. Pouvez-vous le confirmer ?

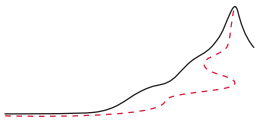
Défi 528 pe

* *

Les exposants et les trois premiers chiffres des valeurs numériques de la constante de Boltzmann $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K et de la combinaison h/ce concordent (mais pas les unités !), où h représente la constante de Planck et e est la charge de l'électron. Pouvez-vous montrer que cela n'est que pure coïncidence ?

Défi 529 pe

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 13

AUTO-ORGANISATION ET CHAOS – L'ÉLÉGANCE DE LA COMPLEXITÉ

> « Parler de la physique non linéaire c'est comme qualifier la zoologie d'étude des animaux autres que les éléphants. »
>
> Stanislaw Ulam

Réf. 221

Dans notre énumération des descriptions générales du mouvement, le dernier point concerne l'étude de l'auto-organisation. L'auto-organisation est l'apparition de l'ordre. L'*ordre* est un mot qui fait référence aux *formes*, comme la symétrie complexe des flocons de neige, aux *motifs*, comme les rayures des zèbres, et aux *cycles*, comme l'harmonie musicale lors d'un chant. Chaque exemple de ce que nous appelons *beauté* est une combinaison de formes, de motifs et de cycles. (Êtes-vous d'accord ?) L'auto-organisation peut donc être définie comme étant l'étude de l'origine de la beauté.

Réf. 222

Défi 530 s

L'apparition de l'ordre dans la nature est une observation générale que nous pouvons faire sur celle-ci. Les fluides en particulier exhibent de nombreux phénomènes où l'ordre apparaît et disparaît. Nous pouvons citer le vacillement plus ou moins régulier d'une bougie allumée, le claquement d'un drapeau dans le vent, le flot régulier des bulles jaillissant à partir de petites irrégularités dans la surface d'une coupe à champagne, et la chute régulière ou irrégulière des gouttes d'eau d'un robinet qui fuit.

L'apparition de l'ordre est relevée dans la différenciation cellulaire d'un embryon à l'intérieur du corps d'une femme, dans la formation des motifs colorés des tigres, des poissons tropicaux et des papillons, dans les agencements symétriques des pétales d'une fleur, dans la formation des rythmes biologiques et ainsi de suite.

Tous les processus de croissance sont des phénomènes d'auto-organisation. Avez-vous déjà médité sur la manière merveilleuse dont les dents croissent ? Un matériau pratiquement inorganique façonne des formes dans les rangées supérieures et inférieures des dents, s'ajustant exactement les unes aux autres. La façon dont ce processus est contrôlé constitue toujours un thème de recherche. De façon équivalente, la formation, avant et après la naissance, de réseaux de neurones dans le cerveau est un autre processus d'auto-organisation. Même les processus physiques sous-jacents à la pensée, impliquant des signaux électriques variables, doivent être décrits en termes d'auto-organisation.

L'évolution biologique est un cas exceptionnel de croissance. Prenez l'évolution des formes animales. Il apparaît que la langue des serpents est fourchue parce que c'est la forme la plus efficace pour suivre des traces chimiques laissées par des proies et d'autres serpents de la même espèce. (Les serpents flairent à l'aide de leur langue.) Le nombre fixe des doigts dans une main humaine ou des pétales d'une fleur est aussi une conséquence de l'auto-organisation.

Réf. 223

Page ??

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 140 Exemples d'auto-organisation pour le sable.

TABLEAU 35 Motifs sur le sable dans la mer et sur la plage.

MOTIF	PÉRIODE	AMPLITUDE	ORIGINE
talus de sable	2 à 10 km	2 à 20 m	marées
dunes de sable	100 à 800 m	5 m	marées
méga-ondulations	1 m	0,1 m	marées
ondulations	5 cm	5 mm	vagues
sable musical	95 à 105 Hz	jusqu'à 105 dB	vent sur les dunes de sable, avalanches faisant vibrer la dune

De nombreux problèmes d'auto-organisation sont des problèmes mécaniques : par exemple, l'élaboration des chaînes de montagnes lorsque les continents bougent, la création des séismes ou la formation des agencements réguliers de nuages dans le ciel. Il peut être captivant de méditer, durant un voyage en avion quelque peu monotone, sur les mécanismes sous-jacents à la formation des nuages que vous apercevez depuis cet avion.

Défi 531 e

Les études sur les conditions requises pour l'apparition ou la disparition d'ordre ont montré que leur description ne nécessite qu'un petit nombre seulement de concepts élémentaires, indépendamment des détails du système physique étudié. Cela devient flagrant lorsque nous analysons quelques exemples.

Toute la richesse de l'auto-organisation se dévoile elle-même, tout simplement, dans l'étude du sable. Pourquoi les dunes de sable sont-elles ondulées, comme sur le sol sablonneux au fond de la mer ? Nous pouvons également étudier comment les avalanches se produisent sur les tas de sable escarpés et comment le sable se comporte dans les sabliers, dans les mixeurs ou dans les récipients en vibration. Ces résultats sont souvent étonnants. Par exemple, aussi récemment qu'en 1996, Paul Umbanhowar et ses collaborateurs découvrirent que, lorsqu'un récipient plat contenant de minuscules billes de bronze (autour de 0,165 mm de diamètre) est secoué de haut en bas dans le vide à certaines fréquences, la surface de ce « sable » de bronze forme des amoncellements stables. Ils sont montrés sur la Figure 141. Ces tas, dénommés *oscillons*, montent et descendent également. Un oscillon peut se déplacer et interagir avec un autre.

Réf. 224

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 141 Oscillons formés par des billes de bronze secouées, la taille horizontale est d'environ 2 cm. (© Paul Umbanhowar)

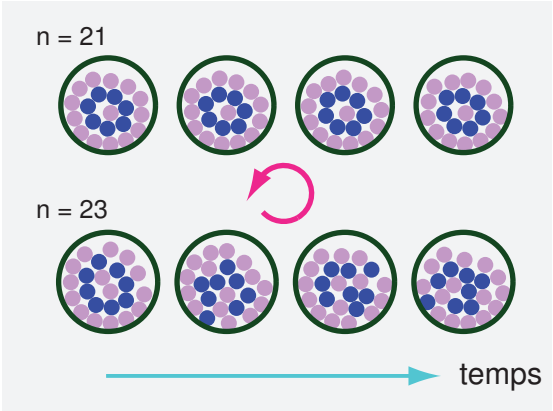


FIGURE 142 Les nombres magiques : 21 sphères, lorsqu'on les fait tourbillonner dans un tambour, se comportent différemment des nombres non magiques de sphères, comme 23. (redessiné à partir de photographies, © Karsten Kötter)

Les oscillons dans le sable représentent un exemple simple d'un effet plus général dans la nature : des systèmes *discrets* dotés d'interactions non linéaires peuvent arbo-
Réf. 225 rer des excitations localisées. Ce sujet fascinant commence tout juste à être étudié. Il se pourrait bien qu'il donne des résultats concernant notre compréhension des particules élémentaires.

Le sable renferme de nombreux autres processus de formation de motifs. Un mélange de sable et de sucre, lorsqu'ils sont déversés sur un tas, forme une structure en couches régulières qui, vue de biais, ressemble aux rayures d'un zèbre. Des cylindres en rotation horizontale, contenant des mélanges binaires, séparent les composants du mélange au bout d'un certain temps. Ou encore prenez un récipient comportant deux compartiments séparés par une cloison de 1 cm. Remplissez les deux moitiés avec du sable et secouez rapidement le récipient tout entier à l'aide d'une machine. À la fin, tout le sable s'accumulera spontanément dans une moitié du récipient. Comme autre exemple d'auto-organisation du sable, certains ont analysé les divers types de dunes de sable qui « chantent » lorsque
Réf. 226 le vent souffle sur elles. En réalité, le comportement du sable et de la poussière s'avère être un thème tellement magnifique et fascinant que la perspective que chaque homme redevienne poussière ne paraît finalement pas si sinistre.

Karsten Kötter et son équipe découvrirent en 1999 un autre exemple simple et élé-
Réf. 227 gant d'auto-organisation. Ils notèrent que le comportement d'un ensemble de sphères qui tourbillonnent dans un tambour dépend du nombre de sphères utilisées. Généralement, toutes les sphères sont continuellement mélangées entre elles. Mais pour certains nombres « magiques », comme 21, des motifs stables en anneau émergent, pour lesquels les sphères extérieures restent à l'extérieur et les sphères intérieures demeurent à l'in-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 143 Auto-organisation : un flocon de neige en croissance. (quicktime © Kenneth Libbrecht)

térieur. Les anneaux, mieux discernés en colorant les sphères, sont montrés sur la Figure 142.

Tout cela, ainsi que de nombreuses autres études de systèmes auto-organisés, a bouleversé notre compréhension de la nature sur un grand nombre de plans. En tout premier lieu, cela nous indique que les motifs et les formes sont similaires aux cycles : ils sont tous dus au mouvement. Sans le mouvement, et donc sans l'histoire, il n'y a pas d'ordre, ni de motifs ou de formes. Chaque motif a une histoire, chaque motif est une conséquence du mouvement. Un exemple en est représenté sur la Figure **??**.

Réf. 228

Deuxièmement, les motifs, les formes et les cycles sont dus au mouvement cohérent d'un grand nombre de petits constituants. Des systèmes qui s'auto-organisent sont toujours composés : ils constituent des *structures coopératives*.

Troisièmement, tous ces systèmes vérifient les équations d'évolution qui sont *non linéaires* pour les variables de configuration.Les systèmes linéaires ne s'auto-organisent pas. De nombreux systèmes auto-organisés exhibent également un mouvement *chaotique*.

Quatrièmement, l'apparition et la disparition de l'ordre dépendent de la vigueur d'une force motrice, que l'on appelle le *paramètre d'ordre*. Souvent, le mouvement chaotique survient lorsque la force motrice s'accroît au-delà de la valeur nécessaire à l'apparition de l'ordre. La turbulence est un exemple de mouvement chaotique, qui apparaît lorsque le paramètre d'ordre, qui est proportionnel à la vitesse du fluide, s'accroît jusqu'à des valeurs élevées.

De plus, toute forme d'ordre et toute structure apparaissent lorsque deux types de mouvement, en général, se concurrencent l'un l'autre, à savoir un processus « moteur » d'augmentation de l'énergie et un mécanisme « dissipatif » de freinage. La thermodynamique joue un rôle dans toute auto-organisation. Les systèmes auto-organisés sont toujours des *systèmes dissipatifs* et sont toujours loin de l'équilibre. Quand le moteur et la dissipation sont du même ordre de grandeur, et quand le comportement clé du système ne représente pas une fonction linéaire de l'action motrice, de l'ordre peut apparaître*.

* Pour décrire le « mystère » de la vie humaine, des mots tels que « flamme », « fleuve » ou « arbre » sont

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Tous les systèmes auto-organisés au commencement de l'apparition de l'ordre peuvent être explicités par des équations décrivant l'amplitude A du motif sous la forme générale

$$\frac{\partial A(t,x)}{\partial t} = \lambda A - \mu|A|^2 A + \kappa\,\Delta A + \text{ordres plus élevés}\,. \tag{100}$$

Ici, l'observable A – qui peut être complexe – est celle qui apparaît, lorsque l'ordre apparaît, comme étant l'amplitude d'oscillation ou l'amplitude du motif. Le premier terme λA est le terme moteur, dans lequel λ est un paramètre décrivant la force de ce moteur. Le terme suivant est une non-linéarité caractéristique en A, μ étant un paramètre qui décrit sa force, et le troisième terme $\kappa\,\Delta A = \kappa(\partial^2 A/\partial x^2 + \partial^2 A/\partial y^2 + \partial^2 A/\partial z^2)$ est un terme dissipatif (et diffusif) caractéristique.

Nous pouvons distinguer deux situations principales. Dans les cas où le terme dissipatif ne joue aucun rôle ($\kappa = 0$), nous trouvons que, lorsque le paramètre moteur λ augmente au-dessus de zéro, une oscillation *temporelle* surgit, c'est-à-dire un cycle stable
Défi 532 pe avec une amplitude non nulle. Dans les cas où le terme diffusif joue un rôle, l'équation (100) décrit comment une amplitude pour une oscillation *spatiale* survient lorsque le paramètre moteur λ devient positif, puisque la solution $A = 0$ devient alors spatialement
Défi 533 pe instable.

Dans les deux cas, le déclenchement de l'ordre est appelé une *bifurcation*, parce qu'à cette valeur critique du paramètre moteur λ la situation avec une amplitude nulle, c'est-à-dire l'état homogène (ou non ordonné), devient instable, et l'état ordonné devient stable. *Dans des systèmes non linéaires, l'ordre est stable.* C'est le résultat conceptuel majeur de ce domaine. L'équation (100) et ses nombreuses variantes nous permettent de décrire un grand nombre de phénomènes, allant des spirales, des ondes, des motifs hexagonaux, et
Réf. 229 des défauts topologiques, jusqu'à certaines formes de turbulence. Pour chaque système physique qui est étudié, la principale tâche consiste à extraire l'observable A et les paramètres λ, μ et κ des processus physiques sous-jacents.

L'auto-organisation est un vaste domaine qui produit de nouveaux résultats presque chaque semaine. Pour découvrir de nouveaux sujets d'étude, il est souvent suffisant de garder tout simplement un œil alerte, la plupart des effets sont accessibles sans connais-
Défi 534 pe sance des mathématiques avancées. Bonne chasse !

La plupart des systèmes qui montrent de l'auto-organisation montrent également un autre type de mouvement. Quand le paramètre moteur d'un système auto-organisé est augmenté vers des valeurs de plus en plus élevées, l'ordre devient de plus en plus irrégulier, et au final nous rencontrons généralement du chaos. Pour les physiciens, le mouvement c[illegible] est le type de mouvement le plus irrégulier qui puisse exister*. Le chaos peut être défini indépendamment de l'auto-organisation, à savoir comme étant le

souvent utilisés par analogie. Ceux-ci sont tous des exemples de systèmes auto-organisés : ils possèdent de nombreux degrés de liberté, ont des forces motrices et de freinage en compétition, dépendent de manière critique de leurs conditions initiales, dénotent un comportement chaotique et irrégulier, et montrent parfois des cycles et un comportement régulier. Les êtres humains et la vie humaine leur ressemblent à tous ces égards, et il existe ainsi un fondement solide pour leur usage en tant que métaphore. Nous pourrions même aller plus loin et stipuler que la beauté à l'état pur *est* de l'auto-organisation à l'état pur. Le manque de beauté résulte en fait souvent d'un équilibre perturbé entre un moteur externe et un freinage externe.

* Sur le thème du chaos, lisez le livre magnifique de H.-O. Peitgen, H. Jürgens & D. Saupe, *Chaos and Fractals*, Springer Verlag, 1992. Il contient des images renversantes, le bagage mathématique nécessaire

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

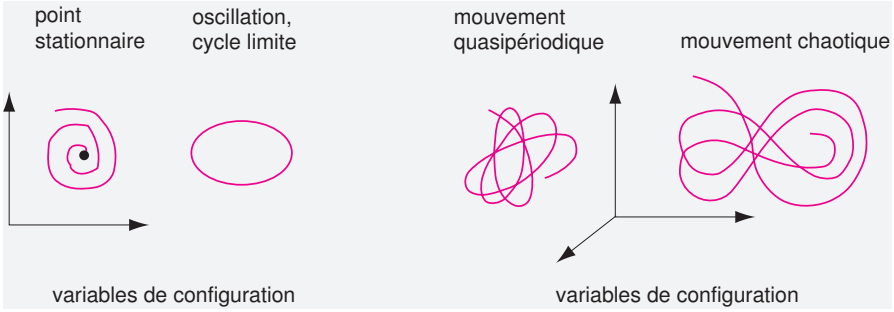


FIGURE 144 Exemples de différents types de mouvement dans l'espace des configurations.

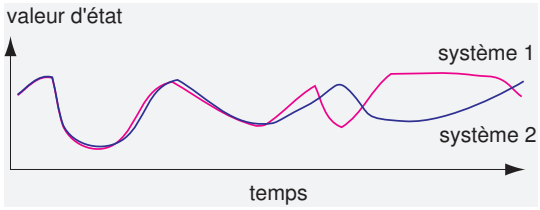


FIGURE 145 Sensibilité aux conditions initiales.

mouvement des systèmes pour lesquels de petites variations dans les conditions initiales évoluent vers des écarts énormes dans le mouvement (de croissance exponentielle avec le temps), comme indiqué sur la Figure 145. Plus précisément, le *chaos* est un mouvement désordonné caractérisé par un *exposant de Lyapounov* positif. Le temps (météorologique) est un tel système, comme le sont les robinets d'eau qui fuient, le lancer d'un dé et de nombreux autres systèmes courants. Par exemple, la recherche sur les mécanismes qui produisent le battement du cœur a révélé que le cœur n'est pas un oscillateur, mais un système chaotique doté de cycles irréguliers. Cela permet au cœur d'être prêt en permanence à faire face à des demandes de changement dans la cadence du battement, ce qui
Réf. 230 se produit dès que le corps a besoin d'augmenter ou de diminuer ses efforts.

À ce propos, pouvez-vous citer un argument simple qui montre que ce que nous ap-
Défi 535 s pelons l'*effet papillon* n'existe pas ? Cet « effet » est souvent évoqué dans les revues : l'explication généralement donnée est que les non-linéarités impliquent qu'une petite variation dans les conditions initiales peut conduire à de vastes effets, donc le battement de l'aile d'un papillon est censé être capable de provoquer une tornade. Bien que les non-linéarités puissent réellement conduire à la croissance de perturbations, l'effet papillon n'a jamais été observé. Il n'existe pas.

Le mouvement chaotique existe également dans les machines : le chaos apparaît dans le mouvement des trains sur les rails, dans les boîtes de vitesses et dans les tuyaux des sapeurs-pompiers. L'étude précise du mouvement qui apparaît dans un briquet zippo
Défi 536 pe fera également, très probablement, ressortir un exemple de chaos. La description mathé-

et quelques programmes informatiques permettant une exploration personnelle de ce sujet. « Chaos » est un terme ancien : d'après la mythologie grecque, la première déesse, Gaia, c'est-à-dire la Terre, émergea du chaos qui régnait au Commencement du monde. Elle donna alors naissance aux autres dieux, aux animaux et aux premiers êtres humains.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

matique du chaos – simple pour certains cas d'école mais extrêmement alambiquée pour d'autres – reste un important sujet de recherches.

Toutes les étapes du désordre à l'ordre, à la quasi-périodicité et finalement au chaos sont des exemples d'auto-organisation. Ces types de mouvement, illustrés sur la Figure 144, sont observés dans un grand nombre de systèmes fluides. Leur étude devrait
Réf. 231 conduire, un jour, à une compréhension plus profonde des mystères de la turbulence. En dépit de la fascination pour ce sujet, nous ne l'explorerons pas davantage, parce qu'elle ne nous conduit pas dans la direction du sommet de la Montagne Mouvement.

Mais l'auto-organisation est également d'un grand intérêt pour une raison plus générale. Des gens affirment parfois que notre aptitude à formuler les modèles et les règles de la nature à partir de l'observation n'implique pas que nous ayons la capacité de prédire *toutes* les observations à partir de ces règles. D'après ce point de vue, des propriétés qualifiées d'« émergentes » existent, c'est-à-dire des propriétés apparaissant dans des systèmes complexes comme quelque chose de *nouveau* qui ne peut pas être déduit des propriétés de leurs parties et de leurs interactions. (La toile de fond idéologique relative à cette idée est évidente, ce fut la dernière tentative pour lutter contre le déterminisme.) L'étude de l'auto-organisation a définitivement tranché ce débat. Les propriétés des molécules d'eau doivent nous autoriser à prédire les chutes du Niagara*. De manière identique, la diffusion des molécules messagères détermine le développement d'une cellule unique dans un corps humain tout entier : en particulier, des phénomènes coopératifs déterminent les emplacements où les bras et les jambes sont formés. Ils garantissent la symétrie droite-gauche (approximative) des corps humains, évitent les amalgames dans les connexions lorsque les cellules de la rétine sont reliées au cerveau, et expliquent les motifs présents sur la fourrure des zèbres et des léopards, pour ne citer que quelques exemples. De la même manière, les mécanismes à l'origine du battement du cœur et de nombreux autres cycles ont été déchiffrés.

L'auto-organisation fournit des préceptes généraux qui nous permettent en principe de prédire le comportement d'un système complexe, quel qu'il soit. Ils sont actuellement appliqués au système le plus complexe connu dans l'univers : le cerveau humain. Les particularités de la manière dont il apprend à coordonner le mouvement du corps, et dont il extrait l'information à partir des images situées dans l'œil sont en train d'être examinées intensivement. Le travail en cours dans ce domaine est passionnant. Si vous
Défi 538 pe projetez de devenir un scientifique, envisagez de prendre cette voie.

Toutes ces études apportent l'argument décisif qui confirme ce que J. Offrey de la Mettrie explorait et disséquait dans son célèbre ouvrage *L'homme machine* en 1748 : les êtres humains sont des machines complexes. En réalité, nos lacunes sur la compréhension des systèmes complexes, par le passé, étaient dues principalement à l'enseignement restrictif de l'étude du mouvement, qui se concentrait généralement – comme nous le faisons dans cette promenade – sur des exemples du mouvement dans des systèmes *simples*. Bien que le sujet de l'auto-organisation fournisse des perspectives séduisantes, et continuera

* Déjà, des versions réduites des chutes du Niagara, à savoir des robinets d'eau qui fuient, dévoilent une
Réf. 232 grande étendue de phénomènes coopératifs, incluant la chute chaotique, c'est-à-dire non périodique, des gouttes d'eau. Cela se produit lorsque l'écoulement de l'eau possède la bonne valeur, comme vous pouvez le
Défi 537 pe vérifier dans votre propre cuisine. Plusieurs phénomènes coopératifs fluides ont été simulés même au niveau moléculaire.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

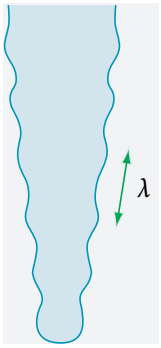


FIGURE 146 La surface ondulée des pics de glace.

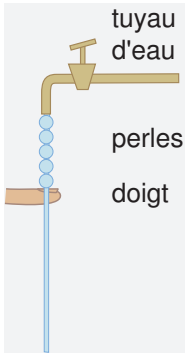


FIGURE 147 Des perles d'eau.

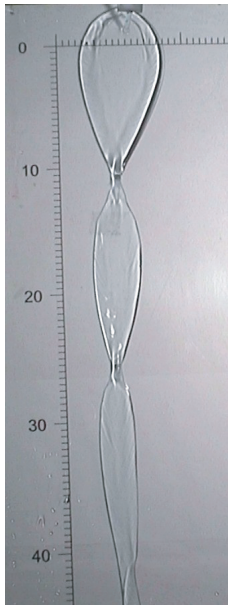


FIGURE 148 Un ruissellement d'eau en forme de tresses. (© Vakhtang Putkaradze)

d'en faire autant pendant les années à venir, nous le laissons maintenant de côté. Nous poursuivons notre aventure destinée à l'exploration des fondamentaux du mouvement*.

> Ich sage euch : man muss noch Chaos in sich haben, um einen tanzenden Stern gebären zu können. Ich sage euch : ihr habt noch Chaos in euch**.
>
> Friedrich Nietzsche, *Also sprach Zarathustra*.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR L'AUTO-ORGANISATION

Tous les pics de glace possèdent une surface ondulée, avec une distance entre deux crêtes d'environ 1 cm, comme indiqué sur la Figure 146. La distance est déterminée par l'influence réciproque qui existe entre l'écoulement de l'eau et le refroidissement de la surface. Comment ?

Défi 539 pe

* *

Lorsque l'on fait tournoyer du vin dans un verre à pied, après que le mouvement s'est adouci, le vin qui coule vers le bas le long de la paroi du verre forme des petits arcs. Pouvez-vous expliquer en quelques mots ce qui provoque cet effet ?

Défi 540 pe

* *

Réf. 233

* Un exemple important d'auto-organisation est l'*humour*.

** Je vous le dis : on doit encore avoir le chaos en nous-mêmes pour pouvoir naître d'une étoile dansante. Je vous le dis : vous avez encore le chaos en vous-mêmes.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Comment la distance moyenne entre des véhicules stationnés le long d'une rue change-t-elle au cours du temps, en supposant qu'il y ait un taux constant de véhicules qui arrivent et qui partent ?

Défi 541 d

* *

Lorsqu'un délicat filet d'eau coule d'un robinet, mettre un doigt dans le ruissellement provoque l'apparition d'une forme ondulée, telle que représentée sur la Figure 147. Pourquoi ?

Défi 542 d

* *

Quand de l'eau émerge d'une ouverture oblongue, l'écoulement produit un motif en forme de tresses, comme indiqué sur la Figure 148. Cet effet résulte de l'action mutuelle et de la compétition entre l'inertie et la tension de surface : l'inertie tend à élargir le flot, alors que la tension de surface tend à le resserrer. La prédiction de la distance qui existe entre une région rétrécie et la suivante constitue toujours un domaine de recherche.

Réf. 234

Si l'expérience est menée à l'air libre, sans récipient, nous observons généralement un effet supplémentaire : il y a un tressage *chiral* au niveau des zones resserrées, induit par les asymétries de l'écoulement de l'eau. Vous pouvez observer cet effet dans les toilettes lorsque vous urinez ! La curiosité scientifique ne connaît pas de limites : êtes-vous un tresseur à droite, à gauche ou les deux à la fois ? Tous les jours ?

Défi 543 pe

* *

Gerhard Müller a découvert une voie magnifique mais élémentaire pour observer l'auto-organisation dans les solides. Son système fournit également un modèle pour un processus géologique très connu : la formation de colonnes hexagonales dans les basaltes, comme dans le Devil's Staircase (l'Escalier du Diable) en Écosse. Des formations identiques sont repérées dans de nombreux autres endroits sur la Terre. Prenez simplement de la poudre de riz ou de la fécule de maïs, mélangez-la avec à peu près la moitié de cette quantité en eau, déposez ce mélange dans une casserole et asséchez-le avec une chandelle. Des colonnes hexagonales se forment. L'analogie fonctionne parce que l'assèchement de l'amidon et le refroidissement de la lave volcanique sont des processus diffusifs gouvernés par les mêmes équations, parce que les conditions limites sont les mêmes, et parce que les deux matières réagissent avec une diminution modérée du volume.

Réf. 235

Défi 544 e

* *

L'écoulement de l'eau dans des tuyaux peut être laminaire (continu) ou turbulent (irrégulier et désordonné). La transition dépend du diamètre d du tuyau et de la vitesse v de l'eau. La transition se produit généralement lorsque le *nombre de Reynolds* – défini comme étant égal à $R = vd/\eta$ (η étant la viscosité cinématique de l'eau, valant approximativement $1\,\mathrm{mm}^2/\mathrm{s}$) – devient supérieur à environ 2 000. Toutefois, des expériences attentives montrent qu'avec une manipulation adéquate des écoulements laminaires peuvent être produits jusqu'à $R = 100\,000$. Une analyse linéaire des équations du mouvement du fluide, les équations de Navier-Stokes, prédit même la stabilité de l'écoulement laminaire pour *tous* les nombres de Reynolds. Ce n'est que dans les années 2003 et 2004 que cette énigme fut résolue. Premièrement, une analyse mathématique complexe indiqua que cet écoulement laminaire n'est pas toujours stable, et que la transition vers la turbulence

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dans un long tuyau survient lorsque des ondes se propagent. C'est alors qu'en 2004 des expériences méticuleuses montrèrent que ces ondes de propagation apparaissent en fait
Réf. 236 lorsque de l'eau s'écoule à travers un tuyau avec de grands nombres de Reynolds.

* *

Pour voir quelques images magnifiques de l'auto-organisation dans les fluides, consultez le site Web http://serve.me.nus.edu.sg/limtt. Entre autres, il montre qu'un tourbillon circulaire peut être « aspiré » dans un second situé juste derrière lui, et que ce processus peut alors se répéter.

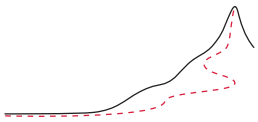
* *

La *danse*, aussi, est un exemple d'auto-organisation. L'auto-organisation prend sa source dans le cerveau. Comme pour tous les gestes compliqués, l'apprentissage est alors souvent un défi. De nos jours il existe des livres admirables qui disent comment la physique
Réf. 237 peut vous aider à améliorer votre habileté à la danse et votre grâce dans les mouvements.

* *

Voulez-vous vous amuser pendant vos études en doctorat de physique ? Allez dans un magasin de jouets scientifiques et cherchez un objet qui se déplace d'une manière particulièrement complexe. Il y a de fortes chances que ce mouvement soit chaotique, explorez ce mouvement et présentez une thèse sur celui-ci. (Ou plus simplement explorez le mouvement d'un câble suspendu dont l'extrémité supérieure est remuée par une source externe.)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 14

DES FRONTIÈRES DE LA PHYSIQUE AUX LIMITES DU MOUVEMENT

> « Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien. »
> Socrate, cité par Platon

La sentence de Socrate s'applique également à la physique galiléenne, en dépit de son large succès triomphant dans les applications techniques et dans la description de la vie quotidienne. Nous allons maintenant donner un court aperçu des lacunes existant dans ce domaine.

Thèmes de recherche en dynamique classique

Bien que la science de la mécanique soit maintenant vieille de plusieurs centaines d'années, la recherche dans la compréhension de ses rouages est toujours en cours.

— Nous avons déjà mentionné ci-dessus le problème de la stabilité du Système solaire. L'avenir à long terme des planètes est inconnu. En général, le comportement des systèmes à quelques corps qui interagissent à travers la gravitation est encore un sujet d'investigations de la physique mathématique. La recherche de la réponse à la question simple de savoir combien de temps un ensemble donné de corps gravitant les uns autour des autres restent ensemble est un défi fantastique. L'histoire de ce *problème à plusieurs corps* est ancienne et compliquée. Des progrès intéressants ont été accomplis, mais la réponse définitive nous échappe toujours.

Réf. 238

— De nombreuses questions demeurent sans réponse dans le domaine de l'auto-organisation, des équations d'évolution non linéaires, et du mouvement chaotique. Elles motivent un grand nombre de chercheurs en mathématiques, physique, chimie, biologie, médecine, et dans les autres disciplines scientifiques.

Qu'est-ce que le contact ?

> « Démocrite proclamait qu'il n'existe qu'une espèce de mouvement : celui qui découle de la collision. »
> Simplicius de Cilicie, *Commentaire sur la Physique d'Aristote*, 42, 10

Réf. 239

De toutes les questions sans réponse de la physique classique, celles sur les détails du contact et des collisions se situent parmi les plus pressantes. En réalité, nous avons défini la masse en termes de variations de vitesse durant des collisions. Mais pourquoi

Page 72

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

les objets changent-ils leur mouvement dans de telles occasions ? Pourquoi des collisions entre deux boules faites en chewing-gum diffèrent-elles de celles entre deux boules en acier inoxydable ? Que se passe-t-il pendant ces instants où le contact est établi ?

Le contact est associé aux propriétés matérielles, qui influencent à leur tour le mouvement d'une manière complexe. La complexité est telle que les sciences qui étudient les propriétés de la matière se développèrent indépendamment du reste de la physique pendant très longtemps. Par exemple, les techniques de la métallurgie (fréquemment citée comme étant la plus ancienne de toutes les sciences), de la chimie et de la cuisine ne furent rapprochées des propriétés du mouvement qu'au vingtième siècle, après avoir été exercées de manière indépendante pendant des centaines d'années. Puisque les propriétés matérielles déterminent l'essence même du contact, nous *avons besoin* de la connaissance de la matière et des matériaux pour comprendre la notion de masse, et donc celle du mouvement. La seconde partie de notre escalade de la montagne lèvera le voile sur ces relations.

Précision et exactitude

Lorsque nous avons commencé à escalader la Montagne Mouvement, nous avons déclaré que pour gagner de l'altitude il fallait accroître la *précision* dans notre description de la nature. Pour rendre cette formulation elle-même encore plus précise, nous faisons une distinction entre deux termes : la *précision* est le degré de reproductibilité, l'*exactitude* représente le degré de conformité à la situation réelle. Ces deux notions s'appliquent aux mesures*, aux énoncés et aux concepts physiques.

Appendix B

En ce moment, le record du nombre de chiffres mesurés pour une quantité physique est de 14. Pourquoi si peu ? La physique classique ne fournit pas de réponse. Quel est le nombre maximum de chiffres que nous pouvons attendre des mesures, qu'est-ce qui le détermine, et comment pouvons-nous espérer l'atteindre ? Ces questions sont toujours sans réponses à ce niveau de notre ascension, elles seront abordées dans la seconde partie de celle-ci.

D'un autre côté, les énoncés ayant une fausse exactitude abondent. Que devrions-nous penser d'un constructeur automobile – Ford – qui revendique que le coefficient de

Défi 545 s

traînée c_w d'un de ses modèles est de 0,375 ? Ou de l'affirmation officielle que le record mondial de la consommation de carburant pour des véhicules est de 2 315,473 km/l ? Ou de l'allégation que 70,3 % de tous les citoyens partagent une certaine opinion ? Une leçon que nous avons apprise des recherches sur les erreurs de mesures est que nous ne devrions jamais fournir plus de chiffres concernant un résultat donné que celui dont nous sommes sûrs et certains.

Est-il possible de dessiner ou de produire un rectangle pour lequel le rapport des longueurs est un nombre réel, par exemple 0, 131520091514001315211420010914..., dont les

Défi 546 s

chiffres pourraient crypter un livre entier ? (Une méthode simple pourrait encoder un espace comme 00, la lettre « a » comme 01, « b » comme 02, « c » comme 03, etc. De façon encore plus intéressante, le nombre pourrait-il être imprimé à l'intérieur du livre qu'il code ?)

* Pour les mesures, la précision et l'exactitude sont toutes les deux mieux décrites par leur *écart-type*, comme expliqué dans l'Annexe B, à la page 312.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Dans notre promenade, nous aspirons à toujours plus de précision et d'exactitude, tout en évitant en même temps la fausse exactitude. Donc, les concepts doivent en premier lieu être *précis* et les descriptions doivent être *exactes*. N'importe quelle inexactitude est une preuve du manque de connaissance. Pour le dire sans ambages, « inexact » signifie *faux*. L'augmentation de l'exactitude et de la précision de notre description de la nature nous suggère de laisser derrière nous toutes les erreurs que nous avons faites jusqu'à présent. Ce sera notre objectif pour la suite.

Est-ce que toute la nature peut être décrite dans un livre ?

Amusons-nous avec un casse-tête relatif à notre aventure. La parution d'un ouvrage de physique parfait, celui qui décrirait toute la nature, pourrait-elle se produire ? Si elle le pouvait, le livre devrait également se décrire lui-même, sa propre construction – en incluant ses lecteurs et son auteur – et, le plus important de tout, son propre contenu. Un tel livre peut-il exister ? En utilisant le concept d'information, nous pouvons établir que ce livre devrait inclure toute l'information contenue dans l'univers. Est-ce possible ? Examinons les possibilités.

Si la nature avait besoin d'un livre *infiniment* long pour être entièrement décrite, une telle publication ne pourrait évidemment pas exister. Dans ce cas, seules des descriptions approximatives de la nature seraient possibles, et un livre exhaustif de physique ne pourrait être concevable.

Si la nature avait besoin d'une quantité *finie* d'information pour sa description, deux voies possibles se présentent. La première est que l'information de l'univers ne pourrait pas être récapitulée dans un livre, donc un livre de physique parfait serait une nouvelle fois impossible. L'autre option est que l'univers doit contenir une quantité finie d'information et qu'il peut être résumé en quelques petites formules. Cela impliquerait que le reste de l'univers n'ajouterait pas d'information à celle déjà contenue dans ce livre complet sur la physique. Dans ce cas, il apparaît que l'entropie du livre et l'entropie de l'univers devraient être identiques. Ceci semble tout à fait improbable.

Nous remarquons que la réponse à cette énigme fournit également la réponse à une autre énigme : celle de savoir si un cerveau peut contenir une description complète de la nature. En d'autres termes, la véritable question est : pouvons-nous comprendre la nature ? Notre excursion jusqu'au sommet de la Montagne Mouvement est-elle possible ? En général, nous le croyons. Finalement, nous croyons en quelque chose qui est plutôt improbable : nous croyons que l'univers ne contient pas plus d'information que ce que notre cerveau peut contenir ou même contient déjà.

Avons-nous fait une erreur dans notre raisonnement ? Oui. Les mots « univers » et « information » ne sont pas correctement utilisés dans l'analyse qui précède, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Nous trouverons une solution à ce casse-tête plus tard dans notre aventure. En attendant, creusez-vous la tête pour vous en faire une idée.

Page ??
Défi 547 e

Pourquoi la mesure est-elle possible ?

Dans la description de la gravitation brossée jusqu'à présent, l'information que chacun a apprise – ou devrait avoir apprise – à l'école, est que l'accélération est reliée à la masse et à la distance par $a = GM/r^2$. C'est tout. Mais cette simplicité est trompeuse. Afin de vérifier si cette description est correcte, nous devons mesurer des longueurs et des

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

durées. Cependant, il est *impossible* de mesurer des longueurs et des intervalles de temps avec une horloge quelconque ou une règle quelconque fondées uniquement sur l'interaction gravitationnelle ! Essayez de concevoir un tel dispositif et vous serez inévitablement
Défi 548 s déçu. Vous avez toujours besoin d'une méthode non gravitationnelle pour actionner et arrêter le chronomètre. De manière similaire, lorsque vous mesurez une longueur, par exemple celle d'une table, vous devez disposer une règle ou tout autre dispositif à proximité de celle-ci. L'interaction nécessaire pour aligner la règle et la table ne peut pas être gravitationnelle.

Une limitation identique s'applique même aux mesures des masses. Tentez de pe-
Défi 549 s ser une masse en utilisant seulement la gravitation. Toute bascule ou balance nécessite d'autres interactions – généralement mécaniques, électromagnétiques ou optiques – pour remplir son rôle. Pouvez-vous confirmer que la même chose s'applique à la vitesse
Défi 550 s et aux mesures des angles ? En résumé, quelle que soit la méthode que nous utilisons, *pour mesurer la vitesse, la longueur, le temps et la masse, des interactions autres que la gravité sont nécessaires*. Notre capacité à faire des mesures montre que la gravité n'est pas la seule à agir.

Le mouvement est-il illimité ?

La physique galiléenne n'explique pas notre aptitude à faire des mesures. En réalité, elle n'explique pas non plus l'existence des étalons de mesure. Pourquoi les objets possèdent-ils des longueurs fixes ? Pourquoi les horloges fonctionnent-elles comme des métronomes ? La physique galiléenne ne parvient pas à expliquer ces observations.

Elle ne formule également aucune explication évidente sur l'univers de manière générale. Elle semble suggérer qu'il est infini. La finitude ne s'ajuste pas avec la description galiléenne du mouvement. Celle-ci n'est donc que partielle dans ses explications parce qu'elle ne tient pas compte des limites du mouvement.

Nous remarquons également que l'existence de vitesses infinies dans la nature ne nous permettrait pas de définir des tranches de temps. La conception des horloges serait alors impossible. En d'autres termes, une description de la nature qui autorise des vitesses illimitées n'est pas du tout précise. La précision requiert des limites. Pour atteindre la plus haute précision possible, nous avons besoin de découvrir toutes les limites relatives au mouvement. Jusqu'à présent, nous n'en avons découvert qu'une seule : il existe une entropie minimale. Nous nous tournons dorénavant vers une autre limite, plus saisissante : celle de la vitesse. Pour appréhender cette limite, nous allons explorer le mouvement le plus rapide que nous connaissions : le mouvement de la lumière.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Annexe A

NOTATION ET CONVENTIONS

Nous avons introduit puis défini, dans ce texte, des concepts nouveaux qui sont notés en *italique*. Ces nouvelles définitions sont également signalées dans l'index par des numéros de page en italique. Naturellement, nous employons les unités du SI partout dans ce livre, celles-ci sont définies dans l'Annexe B. Les résultats expérimentaux sont cités avec une précision limitée, généralement à deux chiffres significatifs seulement, puisque la plupart du temps cela est suffisant pour notre discussion. Des valeurs de référence, de précision plus élevées, peuvent être consultées dans les annexes B et **??**.

En relativité nous utilisons la convention de genre temps, où la métrique possède la signature $(+---)$. 70 % environ de la littérature dans le monde entier l'utilise. Nous notons i, j, k, les indices des trivecteurs et a, b, c, etc. les indices des quadrivecteurs. D'autres conventions spécifiques à la relativité générale sont expliquées lorsqu'elles sont mentionnées dans cet ouvrage.

Réf. 240

L'alphabet latin

> « Ce qui est rédigé sans effort est lu, en général, sans plaisir. »
>
> Samuel Johnson

Réf. 241

Les livres sont des collections de symboles. *L'écriture* fut probablement inventée entre 3400 et 3300 av. J.-C. par les Sumériens, en Mésopotamie (bien que d'autres éventualités soient également discutées). Il fallut alors plus de mille ans pour que les gens commencent à utiliser des symboles pour représenter des sons en lieu et place des concepts : c'est de cette manière que le premier alphabet fut créé. Cela s'est produit entre 2000 et 1600 av. J.-C. (peut-être en Égypte) et a marqué l'avènement de l'alphabet sémitique. L'usage de cet alphabet offrit tant d'avantages qu'il fut immédiatement adopté dans toutes les cultures avoisinantes, sous différentes formes cependant. Par conséquent, l'alphabet sémitique est l'ancêtre de tous les alphabets utilisés dans le monde.

Ce livre est rédigé en utilisant l'alphabet latin. Au premier abord, cela semble vouloir dire que sa prononciation *ne peut être* expliquée par écrit, contrairement à la prononciation d'autres alphabets ou de l'Alphabet Phonétique International (API). (Celles-ci peuvent être expliquées en utilisant l'alphabet du texte fondateur.) Néanmoins, il *est* possible en principe d'écrire un texte qui décrit exactement comment remuer les lèvres, la bouche et la langue pour chaque lettre, en faisant appel à des concepts physiques, lorsque cela s'avère nécessaire. Les descriptions des prononciations que nous trouvons dans les dictionnaires utilisent indirectement ce procédé : ils se réfèrent à la mémoire des mots

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ou des sons prononcés, que l'on rencontre dans la nature.

Historiquement, l'alphabet latin a été dérivé de l'alphabet étrusque, qui constitue lui-même une dérivation de l'alphabet grec. Il en existe deux principales variantes.

L'alphabet latin *archaïque*,
utilisé à partir du sixième siècle AV. J.-C. :

A B C D E F Z H I K L M N O P Q R S T V X

L'alphabet latin *classique*,
utilisé du deuxième siècle AV. J.-C. jusqu'au onzième siècle :

A B C D E F G H I K L M N O P Q R S T V X Y Z

La lettre G fut ajoutée au cours du troisième siècle AV. J.-C., par le premier romain qui ouvrit une école où il fallait s'acquitter d'une taxe, Spurius Carvilius Ruga. Il ajouta une barre horizontale à la lettre C et substitua cette nouvelle lettre à la lettre Z, qui n'était plus utilisée en latin. Au cours du deuxième siècle AV. J.-C., après la conquête de la Grèce, les romains inclurent les lettres Y et Z de l'alphabet grec à la fin du leur (réintroduisant donc effectivement le Z) afin de pouvoir écrire les mots grecs. Cet alphabet latin classique demeura inchangé pendant le millénaire suivant*.

L'alphabet latin classique a été diffusé à travers l'Europe, l'Afrique et l'Asie par les romains pendant leurs conquêtes. Grâce à sa simplicité, il commença à être utilisé pour l'écriture dans de nombreuses autres langues. La plupart des alphabets « latins » modernes comportent quelques autres lettres. La lettre W fut introduite au onzième siècle en français et fut alors adoptée dans la majorité des langues européennes. La lettre U fut introduite au milieu du quinzième siècle en Italie, la lettre J à la fin de ce siècle-là
Réf. 242 en Espagne, pour faire la distinction entre certains sons qui étaient précédemment représentés par V et I. Cette distinction démontra son utilité et était déjà courante dans la plupart des langues européennes, au seizième siècle. Les contractions æ et œ datent du Moyen Âge. D'autres alphabets latins comportent des lettres supplémentaires, comme le *scharfes S* allemand, noté ß, une contraction de « ss » ou « sz », the et les lettres nordiques
Réf. 243 *thorn*, écrites Þ ou þ, et *eth*, notée Ð ou ð, tirées du futhark**, plus d'autres signes.

Les lettres minuscules n'étaient pas utilisées en latin classique, elles datent du Moyen Âge seulement, de l'époque de Charlemagne. Comme la plupart des accents, tels que ê, ç ou ä, lesquels furent également utilisés pour la première fois au Moyen Âge, les lettres minuscules furent introduites pour économiser la surface du papier, très cher à l'époque, en raccourcissant les mots écrits.

* Pour rencontrer des gens qui parlent et qui écrivent en latin, allez sur www.alcuinus.net.

** L'écriture runique, également appelée *futhark* ou *futhorc*, un type d'alphabet utilisé au Moyen Âge dans les territoires germaniques, anglo-saxons et nordiques, dérive probablement aussi de l'alphabet étrusque. La désignation est issue des six premières lettres : f, u, th, a (ou o), r, k (ou c). La troisième lettre est la lettre thorn mentionnée ci-dessus, elle est souvent écrite « Y » en ancien anglais, comme dans « Ye Olde Shoppe ». L'ancien anglais a également emprunté à l'alphabet runique la lettre *wyn* pour représenter le son « w », et le
Réf. 244 eth déjà mentionné. (Les autres lettres utilisées en ancien anglais – qui ne sont pas issues du futhorc – furent le *yogh*, une vieille variante du g, et les ligatures æ ou Æ, appelées *ash*, et œ ou Œ, appelées *ethel*.)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

> « En dehors du chien, le livre est le meilleur ami de l'homme. À l'intérieur du chien, il fait trop sombre pour lire. »
>
> Groucho Marx

TABLEAU 36 Les alphabets grecs archaïque et classique, et la correspondance avec le latin et le système de numération indienne.

Arch.	Class.		Nom	Corresp.	
Α	Α	α	alpha	a	1
Β	Β	β	bêta	b	2
Γ	Γ	γ	gamma	g, n[1]	3
Δ	Δ	δ	delta	d	4
Ε	Ε	ε	epsilon	e	5
F	Ϝ, ϛ		digamma, stigma[2]	w	6
Ζ	Ζ	ζ	zêta	z	7
Η	Η	η	êta	e	8
Θ	Θ	θ	thêta	th	9
Ι	Ι	ι	iota	i, j	10
Κ	Κ	κ	kappa	k	20
Λ	Λ	λ	lambda	l	30
Μ	Μ	μ	mu	m	40

Arch.	Class.		Nom	Corresp.	
Ν	Ν	ν	nu	n	50
Ξ	Ξ	ξ	xi	x	60
Ο	Ο	ο	omicron	o	70
Π	Π	π	pi	p	80
Ϙ	ϙ, ϟ		koppa[3]	q	90
Ρ	Ρ	ρ	rhô	r, rh	100
Σ	Σ	σ, ς	sigma[4]	s	200
Τ	Τ	τ	tau	t	300
	Υ	υ	upsilon	y, u[5]	400
	Φ	φ	phi	ph, f	500
	Χ	χ	chi	ch	600
	Ψ	ψ	psi	ps	700
	Ω	ω	oméga	o	800
Ϡ	ϡ		sampi[6]	s	900

Les lettres archaïques régionales yot, sha et san ne sont pas incluses dans ce tableau. La lettre san était l'ancêtre de sampi.

1. Seulement s'il est avant les vélaires, c'est-à-dire avant kappa, gamma, xi et chi.
2. « Digamma » est la désignation employée pour la variante en forme de F. Il était principalement utilisé comme lettre (mais aussi parfois, dans sa variante minuscule, en tant que nombre), alors que le tracé et le terme « stigma » sont employés uniquement pour désigner le nombre 6. Ces deux désignations ont été dérivées des tracés respectifs, en réalité le stigma est une variante médiévale et onciale de digamma. Le nom « stigma » découle du fait que cette lettre ressemble à un sigma avec un tau attaché en dessous – bien que malheureusement ce ne soit pas le cas dans toutes les polices de caractère modernes. Le nom original de la lettre, donnant aussi sa prononciation, était « waw ».
3. La version de koppa qui ressemble à un z inversé et incliné est toujours utilisée de manière occasionnelle en grec moderne. La norme Unicode appelle cette variante « koppa ».
4. La deuxième variante de sigma est employée uniquement à la fin des mots.
5. Uspilon correspond au « u » seulement en tant que seconde lettre dans les diphtongues.
6. Jadis, la lettre sampi était positionnée entre pi et koppa.

L'alphabet grec

L'alphabet latin est dérivé de l'étrusque, et l'étrusque du grec. L'alphabet grec fut lui-même issu de l'alphabet phénicien ou d'un alphabet, similaire, sémitique du nord au cours du dixième siècle av. J.-C. L'alphabet grec, pour la première fois, comportait aussi des lettres pour représenter les voyelles, ce qui n'était pas le cas des alphabets sé-

Réf. 245

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mitiques (lesquels en trahissent encore souvent l'absence). Dans l'alphabet phénicien et dans un grand nombre de ses dérivés, comme l'alphabet grec, chaque lettre possède une dénomination propre. Cela est en contradiction avec les alphabets étrusque et latin. Le nom des deux premières lettres grecques sont, bien évidemment, à l'origine du terme *alphabet* lui-même.

Au dixième siècle AV. J.-C., le ionien ou alphabet grec (oriental) *archaïque* était constitué des lettres majuscules uniquement. Au sixième siècle AV. J.-C. plusieurs lettres furent abandonnées, tandis que quelques nouvelles lettres et les versions en minuscule furent introduites, donnant naissance à l'alphabet grec *classique*. Par la suite, les accents, les indices et les aspirées furent introduits. Le Tableau 36 donne également les valeurs indiquées par ces lettres lorsqu'elles étaient utilisées comme nombre. Pour cet usage particulier, les anciennes lettres obsolètes furent conservées pendant la période classique, elles se sont ainsi également vues attribuer des formes minuscules.

La correspondance latine dans le tableau est celle classique, qui est utilisée de manière standard pour la transcription des mots grecs. La question de la *prononciation* correcte du grec a été ardemment débattue dans les cercles de spécialistes, la *prononciation érasmienne* traditionnelle ne correspond ni aux résultats de la recherche linguistique, ni au grec moderne. En grec classique, le bêlement de la brebis s'écrit βη–βη. (La prononciation érasmienne insiste à tort sur un η plus court, la prononciation du grec moderne est différente pour β, lequel est dorénavant prononcé « v », et pour η, qui est maintenant prononcé comme « i: » – un long « i ».) La prononciation du grec a manifestement varié au cours du temps et d'une région à l'autre. Pour le grec attique, le principal dialecte parlé dans la période classique, la question est dorénavant tranchée. La recherche linguistique a montré que chi, phi et thêta étaient moins aspirés que tel qu'ils sont généralement prononcés en français, et sonnent plus comme le son initial de « cartable », « parfait » et « tintin ». De surcroît, le zêta semble avoir été prononcé plus comme « zd » tel que dans le mot « mazdéen ». De même que pour les voyelles, contrairement à la tradition, epsilon est fermé et court alors que êta est ouvert et long, omicron est fermé et court tandis que oméga est large et long, et upsilon est en vérité un son « ou » comme dans « mou », et ne ressemble pas au « u » français ou au « ü » allemand.

Les voyelles grecques peuvent avoir des *aspirées* rudes ou douces, des *indices*, et des *accents* circonflexes ou diérèses aigus et graves. Les aspirées – utilisées également pour ρ – déterminent si la lettre est prononcée en expirant l'air. Les accents, qui étaient interprétés avec une idée d'insistance dans la prononciation érasmienne, représentaient en fait la hauteur des intonations. Le grec classique pouvait avoir jusqu'à trois de ces signes supplémentaires par lettre, le grec moderne n'en a jamais plus d'un.

L'*alphabet cyrillique* est un autre descendant de l'alphabet grec*, il est employé avec

* L'alphabet grec est également à l'origine de l'*alphabet gotique*, qui a été défini au quatrième siècle par Wulfila pour la langue gotique, en utilisant également quelques signes provenant de l'écriture latine et du futhorc.

L'alphabet gotique ne doit pas être confondu avec ce que nous appelons l'*écriture gothique*, un style de l'alphabet *latin* utilisé dans toute l'Europe à partir du onzième siècle. Dans les territoires latins, les lettres gothiques furent remplacées au seizième siècle par l'*Antiqua*, l'ancêtre de la fonte sur laquelle s'appuie ce texte. Dans d'autres pays, l'écriture gothique resta en usage pendant plus longtemps. Elle était utilisée dans l'imprimerie et dans les manuscrits en Allemagne jusqu'en 1941, date où le gouvernement nazi l'a subitement abolie, afin de se conformer à une forte demande de la population. Elle fit l'objet d'un usage sporadique

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

des légères variantes dans de nombreuses langues slaves, comme le russe et le bulgare. Néanmoins, il n'existe aucune transcription standard du cyrillique au latin, de telle sorte que souvent, le même nom russe est épelé différemment dans des pays différents ou encore dans le même pays à différentes occasions.

TABLEAU 37 Les débuts de l'abjad hébreu.

Lettre	Nom	Correspondance	
א	aleph	a	1
ב	beth	b	2
ג	gimel	g	3
ד	daleth	d	4
etc.			

Alphabet hébreu et autres écritures

L'alphabet phénicien est aussi à l'origine de l'alphabet hébraïque à base de consonnes ou *abjad*. Ses premières lettres sont données dans le Tableau 37. Seule la lettre aleph est communément utilisée en mathématiques, bien que d'autres aient été proposées.

Réf. 246
Page ??

Une centaine de systèmes d'écriture environ sont utilisés partout dans le monde. Les spécialistes les classent en cinq groupes. Les *alphabets phonématiques*, tels que le latin ou le grec, possèdent un signe pour chaque consonne et chaque voyelle. Les *abjads* ou alphabets consonantiques, tels que l'hébreu ou l'arabe, ont un signe pour chaque consonne (en incluant parfois quelques voyelles, comme aleph), et ne transcrivent pas (toutes) les voyelles, la plupart des abjads sont écrits de la droite vers la gauche. Les *abugidas*, également dénommés alphabets syllabiques ou alphasyllabaires, tels que le balinais, le birman, le devanagari, le tagalog, le thaïlandais, le tibétain ou le laotien, écrivent des consonnes et des voyelles. Chaque consonne possède une voyelle par défaut qui peut être changée en une autre à l'aide d'un signe diacritique. Les *syllabaires*, tels que le hiragana ou le guèze, possèdent un signe pour chaque syllabe de la langue. Finalement, des écritures complexes, comme le chinois, les hiéroglyphes mayas ou égyptiens, utilisent des signes qui possèdent à la fois un son et une signification. Les systèmes d'écriture peuvent avoir un texte qui se lit de droite à gauche, et de bas en haut, et peuvent ainsi numéroter les pages d'un livre dans le sens opposé à ce livre.

Bien qu'il y ait environ 7 000 langues sur Terre, il n'existe à peu près qu'une centaine de systèmes d'écriture seulement en usage aujourd'hui. Cinquante autres systèmes d'écritures environ ne sont plus utilisés*. Pour les formules physiques et mathématiques, cependant, le système de symboles utilisé dans ce texte, basé sur des lettres latines et grecques, écrit de la gauche vers la droite et de haut en bas, est un standard employé partout dans le monde. Il est utilisé de manière indépendante du système d'écriture du texte

Réf. 247

à travers l'Europe. Dans de nombreux livres de physique et de mathématiques, les lettres gothiques sont utilisées pour symboliser des quantités vectorielles.

* Le site www.omniglot.com est un site Web bien conçu sur ce sujet. Les principaux systèmes d'écriture passés et actuels sont encodés en Unicode standard, qui englobe à présent 52 systèmes d'écriture. Consultez www.unicode.org.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

qui le contient.

Chiffres et nombres

Les chiffres et la méthode utilisée dans ce livre pour écrire les nombres sont tous deux originaires de l'Inde. Ils furent véhiculés jusqu'à la méditerranée par les mathématiciens arabes pendant le Moyen Âge. Le système de numération employé dans cet ouvrage est ainsi beaucoup plus récent que l'alphabet*. Les nombres indiens furent popularisés en Europe par Léonard de Pise, appelé Fibonacci**, dans son ouvrage *Liber Abaci* ou « Le livre des calculs », qu'il publia en 1202. Ce chef-d'œuvre révolutionna les mathématiques. Quiconque avait une feuille de papier et une plume (le crayon n'avait pas encore été inventé) était dorénavant capable d'évaluer et de noter des nombres aussi grands que lui permettait son imagination, ou plus grands encore, et d'effectuer des calculs avec eux. Le livre de Fibonacci commençait ainsi :

> Novem figure indorum he sunt 9 8 7 6 5 4 3 2 1. Cum his itaque novem figuris, et cum hoc signo 0, quod arabice zephirum appellatur, scribitur quilibet numerus, ut inferius demonstratur***.

La méthode indienne pour écrire les nombres est constituée d'une grande innovation, la *notation positionnelle*, et d'une petite, le chiffre zéro. La notation positionnelle, comme elle fut décrite par Fibonacci, était tellement plus efficace qu'elle remplaça entièrement le *système de numération romain* antérieur, qui écrivait 1996 comme IVMM ou MCMIVC ou MCMXCVI, ainsi que le *système de numération grec*, dans lequel les lettres grecques étaient employées comme nombres de la manière indiquée dans le Tableau 36, écrivant donc 1996 ainsi : ,αϡϙς′. Par rapport à ces systèmes, les chiffres indiens sont beaucoup plus perfectionnés. En vérité, le système indien s'avéra être si pratique que les calculs effectués sur une feuille évincèrent complètement l'usage impérieux du *boulier*, qui tomba par conséquent en désuétude. Le boulier est toujours utilisé, seulement dans les régions qui n'emploient pas une notation positionnelle pour écrire les nombres. (Le système indien élimina également la nécessité d'avoir des systèmes pour représenter les nombres à l'aide des doigts. De tels systèmes, qui peuvent représenter des nombres allant jusqu'à 10 000 et plus, n'ont laissé qu'une seule trace : le mot anglais qui veut dire chiffre, « digit », dérive du mot latin qui signifie doigt****.) De manière similaire, seul le système de numération

---

* L'histoire du développement des nombres est contée de façon très intéressante par G. Ifrah, *Histoire universelle des chiffres*, Seghers, 1981, qui a été traduit dans plusieurs langues. Il en synthétisa la généalogie en dix magnifiques tableaux, un pour chaque chiffre, à la fin de son livre. Néanmoins, il contient de nombreuses erreurs factuelles, comme expliqué dans les critiques www.ams.org/notices/200201/rev-dauben.pdf et www.ams.org/notices/200202/rev-dauben.pdf.

Il n'est pas exact de qualifier les chiffres de 0 à 9 d'*arabes*. Les véritables chiffres arabes et les chiffres utilisés dans les textes en latin, de même que le présent texte, dérivent tous des chiffres indiens. Seuls les chiffres 0, 2, 3 et 7 ressemblent à ceux utilisés dans l'écriture arabe, et alors seulement s'ils sont inclinés de 90° dans le sens horaire.

** Léonard de Pise, appelé Fibonacci (n. vers 1175 Pise, d. 1250 Pise), fut un mathématicien italien, et le plus important mathématicien de son époque.

*** « Les neuf figures des indiens sont : 9 8 7 6 5 4 3 2 1. Avec ces neuf figures, et avec ce signe 0 qui est appelé zephirum en arabe, n'importe quel nombre peut être écrit, comme nous le démontrerons ci-dessous. »

**** En français, le mot chiffre vient de l'arabe *sifr*, utilisé pour « zéro » et signifiant « le vide ». [N.d.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à position permet les calculs mentaux et a rendu – et rend toujours – les prodiges du calcul possibles*.

Les symboles utilisés dans ce texte

> Pour éviter la fastidieuse répétition de ces mots « est égal à » je poserai, comme je le fais souvent, une paire de parallèles, ou deux lignes jumelles de même longueur, donc « = », parce que rien n'est plus pareil que deux jumeaux.
>
> Robert Recorde**

Outre le texte et les nombres, les livres de physique contiennent d'autres symboles. La plupart de ces symboles ont été développés sur des centaines d'années, de telle façon que seuls les plus évidents et les plus simples d'entre eux sont maintenant utilisés. Dans cette ascension montagneuse, les symboles utilisés comme abréviations pour des quantités *physiques* sont tous empruntés aux alphabets latin et grec et sont toujours définis dans le contexte où ils sont employés. Les symboles désignant des unités, des constantes et des particules sont définis dans les Annexes B et **??**. Il existe une norme internationale pour leur usage (ISO 31), mais elle est en fait inaccessible, les symboles utilisés dans ce texte sont ceux qui sont couramment utilisés. Réf. 246

Les symboles *mathématiques* dont fait usage ce livre, en particulier ceux concernant les opérations et les relations, sont donnés dans la liste qui suit, en même temps que leurs origines. Leur genèse précise a été largement étudiée dans la littérature. Réf. 249

D'autres signes utilisés ici ont des origines plus compliquées. Le signe & est une contraction du latin *et*, comme cela se manifeste souvent plus clairement dans ses différentes déclinaisons, comme *&*, la forme italique commune. Réf. 250

Chacun des signes de ponctuation employés dans les phrases avec les alphabets latins modernes, tels que , . ; : ! ? ‘ ’ « » – ( ) ... possède sa propre histoire. Nombre d'entre eux sont issus de la Grèce antique, mais le point d'interrogation provient du règne de Charlemagne, et le point d'exclamation apparaît pour la première fois au seizième siècle***. Réf. 251 Le @ ou *arobase* émerge probablement d'une abréviation médiévale du latin *ad*, signifiant « à », de la même manière que le signe & évolua du latin *et*. Très récemment, le *smiley* :-) et ses diverses déclinaisons sont devenus populaires. Le smiley est en fait une nouvelle version du « point d'ironie » qui a été autrefois proposé, sans succès, par A. de Brahm (1868–1942). Réf. 252

---

* Actuellement, le temps le plus court pour découvrir la treizième racine (entière) d'un nombre à cent chiffres, dont le résultat est à 8 chiffres, est de 11,8 secondes. Pour en savoir plus sur les récits et les méthodes des prodiges du calcul, consultez la bibliographie. Réf. 248

** Robert Recorde (vers 1510–1558) était un mathématicien et médecin anglais, il mourut en prison car il avait des dettes. Cette citation est tirée de son ouvrage *The Whetstone of Witte*, 1557. Une image indiquant cette phrase dans son manuscrit peut être consultée sur le site Web members.aol.com/jeff94100/witte.jpg. On propose en général que cette citation est la première introduction du signe égal, des revendications qui stipulent que les mathématiciens italiens employaient le signe égal avant Recorde, ne sont confirmés par aucun exemple convaincant. Réf. 249

*** Sur les parenthèses, lisez le magnifique ouvrage de J. Lennard, *But I Digress*, Oxford University Press, 1991.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Symbole	Signification	Origine
$+, -$	plus, moins	J. Regiomontanus 1456 ; le signe plus est dérivé du latin « et »
$\sqrt{}$	se prononce « racine carée »	utilisé par C. Rudolff en 1525 ; ce signe provient d'une déformation de la lettre « r », initiale du mot latin *radix*
$=$	égal à	R. Recorde 1557
$\{\}, [\,], (\,)$	symboles de groupement	son usage commença au seizième siècle
$>, <$	plus grand que, plus petit que	T. Harriot 1631
$\times$	multiplié par, fois	W. Oughtred 1631
:	divisé par	G. Leibniz 1684
$\cdot$	multiplié par, fois	G. Leibniz 1698
a^n	puissance	R. Descartes 1637
x, y, z	coordonnées, inconnues	R. Descartes 1637
$ax+by+c=0$	constantes et équations pour des inconnues	R. Descartes 1637
$\mathrm{d}/\mathrm{d}x$, $\mathrm{d}x$, $\int y\,\mathrm{d}x$	dérivée, différentielle, intégrale	G. Leibniz 1675
φx	fonction de x	J. Bernoulli 1718
$fx, f(x)$	fonction de x	L. Euler 1734
$\Delta x, \sum$	différence, somme	L. Euler 1755
$\neq$	est différent de	L. Euler dix-huitième siècle
$\partial/\partial x$	dérivée partielle, lire comme « $\mathrm{d}/\mathrm{d}x$ »	il fut emprunté à une forme cursive de « d » ou de la lettre « de » de l'alphabet cyrillique par A. Legendre en 1786
Δ	opérateur laplacien	R. Murphy 1833
$\lvert x\rvert$	valeur absolue	K. Weierstrass 1841
∇	prononcer « nabla » (ou « del »)	introduit par William Hamilton en 1853 et P.G. Tait en 1867, par analogie avec la forme d'un ancien instrument musical égyptien
$[x]$	l'unité de mesure d'une quantité x	vingtième siècle
∞	infini	J. Wallis 1655
π	$4\arctan 1$	H. Jones 1706
e	$\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{n!}=\lim_{n\to\infty}(1+1/n)^n$	L. Euler 1736
i	$+\sqrt{-1}$	L. Euler 1777
$\cup, \cap$	union et intersection d'ensembles	G. Peano 1888
$\in$	élément de	G. Peano 1888
$\varnothing$	ensemble vide	André Weil en tant que membre du groupe N. Bourbaki au début du vingtième siècle
$\langle\psi\rvert, \lvert\psi\rangle$	vecteurs d'état bra et ket	Paul Dirac 1930
$\otimes$	produit dyadique, produit tensoriel ou produit de Kronecker	inconnue

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Le symbole paragraphe § apparut au treizième siècle en Italie du nord, comme le montra le paléographe allemand Paul Lehmann. Il fut dérivé de versions ornementales de la lettre capitale C pour *capitulum*, c'est-à-dire « petite tête » ou « chapitre ». Ce signe se manifesta pour la première fois dans les textes juridiques, où il est toujours d'usage aujourd'hui, puis se répandit dans d'autres domaines.

Réf. 253

Le pied de mouche ¶ a été dérivé d'une forme ancienne plus simple ressemblant à la lettre grecque Γ, un signe qui était utilisé dans les manuscrits de la Grèce antique jusque tard au Moyen Âge, pour marquer le début d'un nouveau paragraphe de texte. Au Moyen Âge il prit sa forme moderne, probablement parce qu'une lettre c pour *caput* fut ajoutée devant lui.

Un des plus importants symboles parmi tous, l'*espace blanc* qui sépare les mots, provient des influences celtiques et germaniques lorsque ces sociétés commencèrent à utiliser l'alphabet latin. Il devint d'usage commun entre le neuvième et le treizième siècle, en fonction de la langue considérée.

Réf. 254

Calendriers

Les multiples manières de conserver une trace du temps diffèrent grandement d'une civilisation à l'autre. Le calendrier le plus courant, et celui utilisé dans ce texte, est également l'un des plus insensé, puisqu'il constitue un compromis entre les diverses forces politiques qui s'efforcèrent de le façonner.

Jadis, des entités localement indépendantes, comme des tribus ou des villes, préféraient les calendriers *lunaires*, parce que la mesure du temps lunaire est localement facile à mettre en œuvre. Cela a conduit à l'usage du mois comme unité calendaire. Les états centralisés ont imposé des calendriers *solaires*, fondés sur l'année. Les calendriers solaires exigent des astronomes, et donc une autorité centrale pour les financer. Pour diverses raisons, les agriculteurs, les hommes politiques, les percepteurs des impôts, les astronomes, et certains groupes religieux, mais pas tous, voulaient que le calendrier suive l'année solaire aussi précisément que possible. Les ajustements nécessaires entre les jours et les années sont à l'origine des jours intercalaires. Les compromis indispensables entre les mois et l'année qui conduisirent aux longueurs variables des mois sont différents selon les calendriers. La structure année–mois la plus couramment employée fut aménagée il y a plus de 2 000 ans par Jules César, et est donc appelée le *calendrier julien*.

Ce système fut anéanti quelques années plus tard seulement : août fut allongé à 31 jours lorsqu'il fut baptisé d'après le nom de l'empereur Auguste. Initialement, ce mois ne comportait que 30 jours, mais afin de montrer qu'Auguste était aussi important que César, qui donna son nom à juillet, toutes les longueurs des mois de la seconde moitié de l'année furent modifiées, et février fut raccourci d'un jour supplémentaire.

Réf. 255

La *semaine* est une invention du royaume de Babylone. Une journée dans la semaine babylonienne était « malfaisante » ou « malchanceuse », donc il valait mieux ne rien faire ce jour-là. Le cycle moderne de la semaine, avec son jour de repos, est issu de cette superstition. (La manière dont la superstition astrologique et l'astronomie coopérèrent pour déterminer l'ordre des jours de la semaine est exposée dans la section sur la gravitation.)

Page 152

Bien qu'ayant à peu près trois mille ans d'âge, la semaine fut pleinement intégrée dans

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

le calendrier julien autour de l'an 300 environ, vers la fin de l'Empire romain d'Occident. L'ultime changement dans le calendrier julien se produisit entre 1582 et 1917 (en fonction du pays), lorsque des mesures plus précises de l'année solaire furent utilisées pour établir une nouvelle méthode permettant de déterminer les jours intercalaires, une procédure toujours utilisée aujourd'hui. Associé à une réinitialisation de la date et la détermination du rythme de la semaine, ce standard est appelé le *calendrier grégorien* ou plus simplement le *calendrier moderne*. Il est utilisé par la majorité de la population mondiale.

Malgré sa complexité, le calendrier moderne vous permet vraiment de déterminer le jour de la semaine d'une date donnée que vous auriez en tête. Exécutez simplement les six étapes qui suivent :

1. Prenez les deux derniers chiffres de l'année, et divisez par 4, mettez de côté toute fraction résiduelle ;
2. Ajoutez les deux derniers chiffres de l'année ;
3. Défalquez 1 pour janvier ou février ou une année bissextile ;
4. Ajoutez 6 pour les années 2000 ou 1600, 4 pour les années 1700 ou 2100, 2 pour les années 1800 ou 2200, et 0 pour les années 1900 ou 1500 ;
5. Ajoutez le jour du mois ;
6. Ajoutez la valeur clé correspondant au mois, à savoir 144 025 036 146 pour JFM AMJ JAS OND.

Le reste de la division par 7 donne le jour de la semaine, sachant que la correspondance 1-2-3-4-5-6-0 signifie Dimanche–Lundi–Mardi–Mercredi–Jeudi–Vendredi–Samedi*.

La manière de commencer à compter les années est une question de choix. La plus ancienne méthode non liée aux structures du pouvoir politique en place, est celle qui était utilisée dans la Grèce antique, les années étaient alors comptées à partir des premiers Jeux Olympiques. Les gens avaient l'habitude de dire, par exemple, qu'ils étaient nés dans la première année de la vingt-troisième olympiade. Par la suite, les forces politiques ont systématiquement imposé la numérotation des années à compter d'un certain événement important**. Peut-être qu'il serait digne d'envisager la réintroduction du comptage olympique ?

---

* Le fait de se souvenir du résultat intermédiaire pour l'année en cours peut simplifier encore plus les choses, en particulier puisque les dates 4.4, 6.6, 8.8, 10.10, 12.12, 9.5, 5.9, 7.11, 11.7 et le dernier jour de février tombent tous sur le même jour de la semaine, à savoir sur le résultat intermédiaire de l'année plus 4.

** La comptabilisation actuelle des années fut définie au Moyen Âge en fixant la date du fondement de Rome à l'an 753 AV. J.-C., ou 753 *avant Jésus-Christ*, et en comptant donc en arrière, de telle sorte que les années AV. J.-C. se comportent presque comme des nombres négatifs. Cependant, l'an 1 suit immédiatement l'an 1 AV. J.-C. : il n'y a pas eu d'an 0.

Certains autres standards établis par l'Empire Romain expliquent plusieurs abréviations employées dans la littérature :

- *c.* est une abréviation latine pour *circa* et signifie « environ »,
- i.e. est une abréviation latine pour *id est* et signifie « c'est-à-dire »,
- e.g. est une abréviation latine pour *exempli gratia* et signifie « par la grâce de l'exemple »,
- ibid. est une abréviation latine pour *ibidem* et signifie « au même endroit »,
- inf. est une abréviation latine pour *infra* et signifie « (voir) ci-dessous »,
- op. cit. est une abréviation latine pour *opus citatum* et signifie « le travail cité »,
- et al. est une abréviation latine pour *et alii* et signifie « et les autres ».

Par ailleurs, *idem* signifie « le même » et *passim* veut dire « çà et là » ou « en tous sens ». De nombreuses expressions employées en physique, comme la fréquence, l'accélération, la vitesse, la masse, la force, la quan-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Abréviations et éponymes ou concepts ?

Des propositions telle que celle qui suit sont une calamité pour la physique moderne :

> Le paradoxe EPR dans la formulation de Bohm peut probablement être résolu en faisant appel à l'approche GRW, en utilisant l'approximation WKB de l'équation de Schrödinger.

L'usage de ce vocabulaire constitue la meilleure façon de rendre le discours inintelligible pour les profanes. En premier lieu, il utilise des abréviations, ce qui est une infamie. Par dessus tout, cette phrase utilise le nom d'individus pour caractériser des concepts, c'est-à-dire qu'elle utilise des *éponymes*. À l'origine, les éponymes étaient adressés comme hommages à d'éminents accomplissements. Aujourd'hui, alors que la formulation de nouvelles lois ou variables fondamentales est devenue pratiquement impossible, la diffusion d'éponymes, compréhensibles pour un nombre sans cesse décroissant de personnes, reflète simplement une course vers la renommée de plus en plus stérile.

Les éponymes représentent une preuve du manque d'imagination des scientifiques. Nous les évitons autant que possible dans notre promenade et donnons des noms *communs* aux équations ou entités mathématiques, partout où cela est possible. Les noms des personnes sont alors utilisés comme appositions à ces désignations. Par exemple, « l'équation du mouvement de Newton » n'est jamais appelée « l'équation de Newton », « les équations du champ d'Einstein » est cité au lieu des « équations d'Einstein » et « l'équation du mouvement de Heisenberg » est employé à la place de « l'équation de Heisenberg ».

Toutefois, certaines exceptions sont inévitables : quelques termes employés en physique moderne n'ont aucune véritable alternative. La constante de Boltzmann, l'échelle de Planck, la longueur d'onde de Compton, l'effet Casimir, les groupes de Lie et l'algèbre de Virasoro en sont des exemples. En compensation, ce texte s'assure que vous pouvez consulter les définitions de ces concepts grâce à l'index. De surcroît, celui-ci tente d'en rendre sa lecture très agréable. Réf. 257

tité de mouvement, l'inertie, la gravitation et la température, sont dérivées du latin. En réalité, l'idée selon laquelle la langue de la science a été le latin pendant plus de deux mille ans reste un sujet de controverses. À l'époque des romains c'était le vocabulaire latin avec la grammaire latine, à l'époque moderne elle se changea en vocabulaire latin avec grammaire française, puis pendant une brève période en vocabulaire latin avec grammaire allemande, après quoi elle se modifia en vocabulaire latin avec grammaire anglaise/américaine.

Un grand nombre d'unités de mesure date également de l'époque romaine, comme nous l'expliquerons dans le prochain annexe. Même l'engouement pour les termes techniques grecs, comme le montre l'invention des mots « gyroscope », « entropie » ou « proton », date de l'époque des romains. Réf. 256

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Annexe B

UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES

Mesurer consiste à comparer avec un étalon. Un étalon est basé sur une *unité*. Une multitude de systèmes d'unités différents ont été utilisés à travers le monde. La plupart des étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Une telle autorité peut être utilisée abusivement : c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même jadis. La solution est identique dans les deux situations : mettre sur pied un étalon indépendant et général. Au sujet des unités, cela eut lieu au dix-huitième siècle : pour éviter des abus de la part d'institutions autoritaires, pour évincer les problèmes dus aux unités de référence différentes, variables et non reproductibles, et – ce n'est pas une blague – pour simplifier le recouvrement des impôts, un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. On l'appelle le *Système International d'Unités*, *SI* en abrégé, et il est défini par un traité international, la « Convention du Mètre ». Les unités sont régies par un organisme international, la « Conférence Générale des Poids et Mesures », et ses organisations filles, la « Commission Internationale des Poids et Mesures » et le « Bureau International des Poids et Mesures » (BIPM), qui ont toutes vu le jour au même moment, juste avant la Révolution française.

Réf. 258

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*, dont les définitions officielles sont données ci-dessous, avec les dates de leurs formulations :

- « La *seconde* est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 kelvin. » (1967)*
- « Le *mètre* est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde. » (1983)
- « Le *kilogramme* est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. » (1901)*
- « L'*ampère* est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. » (1948)
- « Le *kelvin*, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. » (1967)*
- « La *mole* est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. » (1971)*
- « La *candela* est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. » (1979)*

Notez que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un modèle de référence du mouvement, à savoir la lumière. C'est une illustration supplémentaire qui souligne le fait que l'observation du mouvement, qui est le type fondamental de changement, est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. Par ailleurs, l'emploi de la lumière dans les définitions avait déjà été proposé en 1827 par Jacques Babinet*.

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités sont définies par multiplication et division. Ainsi, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes :

- Les unités du SI forment un système ayant *la précision de l'état de l'art* : toutes les unités sont définies avec une précision qui est supérieure à la précision des mesures couramment effectuées. De plus, la précision de ces définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle dans la définition de la seconde se situe autour de 10^{-14}, 10^{-10} environ pour le mètre, 10^{-9} environ pour le kilogramme, 10^{-7} pour l'ampère, moins de 10^{-6} pour la mole, 10^{-6} pour le kelvin et 10^{-3} pour la candela.
- Les unités du SI forment un système *absolu* : toutes les unités sont définies de telle manière qu'elles puissent être reproduites dans tout laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une précision élevée. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui détermine les étalons. (Le kilogramme, toujours défini à l'aide d'un artéfact, est la dernière exception à cette exigence, une recherche intensive est en cours pour éliminer cet objet de la définition – une compétition internationale qui prendra encore quelques années. Il existe deux approches : dénombrer des particules ou fixer $\hbar$. La première peut être accomplie dans des cristaux, la dernière en utilisant n'importe quelle formule où $\hbar$ apparaît, comme la formule de la longueur d'onde de de Broglie ou celle de l'effet Josephson.)
- Les unités du SI forment un système *pratique* : les unités de base sont des quantités dont la grandeur est familière. Les unités couramment employées possèdent des dénominations et des abréviations standard. La liste complète inclut les sept unités de base, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Les unités *supplémentaires* du SI sont les deux suivantes : l'unité de l'angle (plan), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon, est le *radian* (rad). Pour l'angle solide, défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon, l'unité est le *stéradian* (sr).

Les unités *dérivées* ayant un nom spécial, dans leur désignation officielle en français, c'est-à-dire sans lettre capitale et sans accent, sont :

* Les symboles respectifs sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Le prototype international du kilogramme est un cylindre en platine–iridium conservé au BIPM à Sèvres, en France. Pour obtenir plus de précisions sur les niveaux de l'atome de césium, consultez un livre sur la physique atomique. L'échelle Celsius d'une température θ est définie ainsi : $\theta/°C = T/K - 273,15$, remarquez le minuscule écart avec le nombre apparaissant dans la définition du kelvin. Le SI stipule également : « Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules ». Dans la définition de la mole, nous sous-entendons que les atomes du carbone 12 sont non liés, au repos et dans leur état fondamental. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555,5 nm, c'est-à-dire la couleur verte, qui est à peu près égale à la longueur d'onde où l'œil est le plus sensible.

Réf. 259

* Jacques Babinet (1794–1874) fut un physicien français qui publia des travaux importants en optique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nom	Symbole
hertz	$Hz = 1/s$
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/m\,s^2$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$
volt	$V = kg\,m^2/As^3$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/A^2s^3$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/As^2$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/A^2s^2$
lumen	$lm = cd\,sr$
becquerel	$Bq = 1/s$
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$

Nom	Symbole
newton	$N = kg\,m/s^2$
joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
coulomb	$C = As$
farad	$F = As/V = A^2s^4/kg\,m^2$
siemens	$S = 1/\Omega$
tesla	$T = Wb/m^2 = kg/As^2 = kg/Cs$
degré Celsius	°C (cf. définition du kelvin)
lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
katal	$kat = mol/s$

Nous remarquons que dans toutes les définitions de ces unités, le kilogramme n'apparaît qu'aux puissances 1, 0 et -1. L'explication finale de cette réalité n'est apparue que récemment. Pouvez-vous tenter d'en formuler la raison ?

Défi 551 pe

Les unités *admises* non SI sont la *minute*, l'*heure*, le *jour* (pour le temps), le *degré* $1° = \pi/180$ rad, la *minute* $1' = \pi/10\,800$ rad, la *seconde* $1'' = \pi/648\,000$ rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. On doit éviter toutes les autres unités.

On rend plus pratiques toutes les unités du SI grâce à l'introduction de désignations et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que nous appelons les *préfixes** :

10^n	Nom	Symb.	10^n	Nom	Symb.
10^1	déca	da	10^{-1}	déci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	µ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	péta	P	10^{-15}	femto	f

10^n	Nom	Symb.	10^n	Nom	Symb.
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
non officiel :			Réf. 260		
10^{27}	xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{30}	wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{33}	vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
10^{36}	udekta	U	10^{-36}	udeko	u

* Certains de ces noms sont inventés (yocto qui se prononce de manière presque identique au latin *octo* « huit », zepto qui se prononce presque comme le mot latin *septem*, yotta et zetta qui leur ressemblent, exa et péta qui se prononcent comme les mots grecs ἑξάκις et πεντάκις pour « six fois » et « cinq fois », ceux qui ne sont pas officiels se prononcent comme les mots grecs désignant neuf, dix, onze et douze). Certains sont issus du danois/norvégien (atto pour *atten* « dix-huit », femto pour *femten* « quinze »), certains proviennent du latin (de *mille*, de *centum* « cent », de *decem* « dix », de *nanus* « nain »), certains sont tirés de l'italien (de *piccolo* « petit »), certains sont grecs (micro provient de μικρός « petit », déca/déka de δέκα « dix », hecto de ἑκατόν « cent », kilo de χίλιοι « mille », méga de μέγας « grand », giga de γίγας « géant », téra de τέρας « monstre »).

Interprétez : J'étais bloqué dans un tel embouteillage que j'ai mis un microsiècle pour faire un picoparsec et que ma consommation de carburant fut de deux dixièmes d'un millimètre carré.

Défi 552 e

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

- Les unités du SI forment un système *exhaustif* : elles recouvrent de manière systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles fixent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.
- Les unités du SI forment un système *universel* : elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, dans l'industrie, dans le commerce, à la maison, dans l'enseignement et dans la recherche. Elles pourraient même être employées par des civilisations extraterrestres, si celles-ci existaient.
- Les unités du SI forment un système *cohérent* : le produit ou le quotient de deux unités du SI est aussi une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, « SI » par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne constituent pas l'unique ensemble possible qui puisse vérifier toutes ces conditions, mais elles sont le seul système existant qui le fait*.

Rappelez-vous que puisque chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, toute mesure exige de la matière pour réaliser l'étalon (oui, même pour la vitesse standard), et du rayonnement pour accomplir cette comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils peuvent être clairement dissociés l'un de l'autre.

Page ??

Unités naturelles de Planck

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens emploient souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations sous une forme simple. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont reliées. En physique microscopique, le système des *unités naturelles de Planck* est souvent utilisé. Il est défini en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont donc définies à partir de combinaisons de constantes fondamentales, celles qui correspondent aux unités de base du SI sont données dans le Tableau 39**. Ce tableau est également utile pour convertir des équations notées en unités naturelles aux unités du SI : substituez simplement chaque quantité X par X/X_{Pl}.

Défi 553 e

* La plupart des unités non SI qui sont toujours d'usage dans le monde sont d'origine romaine. Le mile provient de *milia passum*, qui était équivalent à mille (doubles) enjambées d'environ 1 480 mm chacune. Aujourd'hui un mile nautique, autrefois défini comme une minute d'arc à la surface de la Terre, vaut exactement 1 852 m. Le pouce vient de *uncia*/*onzia* (un douzième – d'un pied actuel). La livre (de l'anglais « pound » qui vient de *pondere* « peser ») est employée comme une traduction de *libra* – balance – qui est à l'origine de son abréviation lb. Même la coutume de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Celles-ci et les autres unités toutes aussi cocasses – comme le système dans lequel toutes les unités commencent avec un « f », et qui utilise le furlong/quinze jours comme unité de vitesse – sont dorénavant officiellement définies comme des multiples des unités du SI.

** Les unités naturelles x_{Pl} données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c'est-à-dire celles définies en utilisant la constante $\hbar$, et non, comme le fit à l'origine Planck, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités électromagnétiques peuvent aussi être définies à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\varepsilon_0$ dans les expressions : par exemple, en utilisant $4\pi\varepsilon_0\alpha$, avec la *constante de structure fine* α, on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour des explications sur les nombres situés entre parenthèses, les écarts types, lisez la page 312.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 39 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

NOM	DÉFINITION			VALEUR		
Unités de base						
Longueur de Planck	l_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1{,}616\,0(12)\cdot 10^{-35}$ m	
Durée de Planck	t_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^5}$	=	$5{,}390\,6(40)\cdot 10^{-44}$ s	
Masse de Planck	m_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c/G}$	=	$21{,}767(16)$ µg	
Courant de Planck	I_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	=	$3{,}479\,3(22)\cdot 10^{25}$ A	
Température de Planck	T_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	=	$1{,}417\,1(91)\cdot 10^{32}$ K	
Unités triviales						
Vitesse de Planck	v_{Pl}	=	c	=	0,3 Gm/s	
Moment cinétique de Planck	L_{Pl}	=	$\hbar$	=	$1{,}1\cdot 10^{-34}$ Js	
Quantum d'action de Planck	S_{aPl}	=	$\hbar$	=	$1{,}1\cdot 10^{-34}$ Js	
Entropie de Planck	S_{ePl}	=	k	=	13,8 yJ/K	
Unités dérivées						
Densité de Planck	ρ_{Pl}	=	$c^5/G^2\hbar$	=	$5{,}2\cdot 10^{96}$ kg/m^3	
Énergie de Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/G}$	=	2,0 GJ = $1{,}2\cdot 10^{28}$ eV	
Quantité de mouvement de Planck	p_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^3/G}$	=	6,5 Ns	
Puissance de Planck	P_{Pl}	=	c^5/G	=	$3{,}6\cdot 10^{52}$ W	
Force de Planck	F_{Pl}	=	c^4/G	=	$1{,}2\cdot 10^{44}$ N	
Pression de Planck	p_{Pl}	=	$c^7/G\hbar$	=	$4{,}6\cdot 10^{113}$ Pa	
Accélération de Planck	a_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/\hbar G}$	=	$5{,}6\cdot 10^{51}$ m/s^2	
Fréquence de Planck	f_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/\hbar G}$	=	$1{,}9\cdot 10^{43}$ Hz	
Charge électrique de Planck	q_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	=	1,9 aC = 11,7 e	
Tension de Planck	U_{Pl}	=	$\sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	=	$1{,}0\cdot 10^{27}$ V	
Résistance de Planck	R_{Pl}	=	$1/4\pi\varepsilon_0 c$	=	30,0 Ω	
Capacité électrique de Planck	C_{Pl}	=	$4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1{,}8\cdot 10^{-45}$ F	
Inductance de Planck	L_{Pl}	=	$(1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	=	$1{,}6\cdot 10^{-42}$ H	
Champ électrique de Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	=	$6{,}5\cdot 10^{61}$ V/m	
Densité du flux magnétique de Planck	B_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	=	$2{,}2\cdot 10^{53}$ T	

Les unités naturelles sont importantes à un autre égard : à chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée d'« infiniment petite (ou grande) », l'expression correcte à considérer est « aussi petite (ou aussi grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante ». Comme on l'explique tout au long de ce texte, et particulièrement dans la Page ?? partie finale, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrémale pour l'observable correspondante – certaines une borne supérieure et d'autres une

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

limite inférieure. Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement déterminés. La valeur extrémale exacte pour chaque observable dans la nature est obtenue lorsque G est remplacé par $4G$, $\hbar$ par $\hbar/2$, k par $k/2$ et $4\pi\varepsilon_0$ par $8\pi\varepsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrémales, ou *unités de Planck corrigées*, sont les *véritables unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrémales, mais uniquement pour certaines quantités étendues. (Pouvez-vous deviner lesquelles ?)

Défi 554 s

Autres systèmes d'unités

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est l'évaluation des intensités de toutes les interactions. Par conséquent il n'est pas pratique de fixer la constante de la gravitation G à un, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies fixent souvent $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$*, laissant seulement la constante gravitationnelle G dans les équations.

Dans ce système, il n'y a qu'une seule unité fondamentale, mais son choix reste libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité de base, longueur qui est l'archétype d'une quantité mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont alors reliées par

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}]\,, \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T]\,, \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha]\,, \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned} \tag{101}$$

où nous avons noté $[x]$ l'unité de la quantité x. Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système**.

Souvent, afin d'avoir un aperçu des énergies nécessaires pour observer un effet en cours d'étude, on choisit une énergie de référence comme unité fondamentale. En physique des particules l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* (eV), défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une

* Des définitions différentes pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entres autres, au système d'unités gaussiennes souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités de Heaviside–Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

Réf. 261

** Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique et B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance, P la puissance, G la constante de la gravitation.

La page Web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités l'une vers l'autre.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_S = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer des masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la *même* dimension, et $\hbar$ possède la dimension d'une surface.

Réf. 262

Déjà au dix-neuvième siècle, George Stoney avait suggéré d'utiliser comme unités de longueur, de temps et de masse les quantités $l_S = \sqrt{Ge^2/(c^4 4\pi\varepsilon_0)} = 1{,}4 \cdot 10^{-36}$ m, $t_S = \sqrt{Ge^2/(c^6 4\pi\varepsilon_0)} = 4{,}6 \cdot 10^{-45}$ s et $m_S = \sqrt{e^2/(G4\pi\varepsilon_0)} = 1{,}9$ µg. Comment ces unités sont-elles reliées aux unités de Planck ?

Défi 555 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

différence de potentiel électrique de 1 volt (« protonvolt » serait une désignation plus appropriée). Ainsi nous avons $1\,\mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$, ou approximativement

$$1\,\mathrm{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\mathrm{aJ} \tag{102}$$

ce qui est facile à mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ donne $G = 6{,}9 \cdot 10^{-57}\,\mathrm{eV}^{-2}$ et nous permet aussi d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la distance, à l'aide des correspondances respectives
Défi 556 e $1\,\mathrm{eV} \equiv 1{,}8 \cdot 10^{-36}\,\mathrm{kg} \equiv 5{,}4 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{Ns} \equiv 242\,\mathrm{THz} \equiv 11{,}6\,\mathrm{kK}$ et $1\,\mathrm{eV}^{-1} \equiv 4{,}1\,\mathrm{fs} \equiv 1{,}2\,\mu\mathrm{m}$.

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations qui suivent sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20 °C ou 293 K, correspond à une énergie cinétique par particule de 0,025 eV ou 4,0 zJ. L'énergie la plus élevée d'une particule, mesurée jusqu'à présent, appartient à un rayon cosmique d'une énergie de
Réf. 263 $3 \cdot 10^{20}$ eV ou 48 J. Ici bas, sur la Terre, nous avons construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des anti-électrons, et un autre capable de produire une énergie de 10 TeV ou 1,6 µJ pour des protons sera bientôt achevé. Ils appartiennent tous les deux au CERN à Genève et possèdent une circonférence de 27 km.

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK, dans un système
Réf. 264 de noyaux de rhodium maintenus par un procédé de refroidissement particulier. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est également la plus petite jamais mesurée : elle correspond à 24 feV ou $3{,}8\,\mathrm{vJ} = 3{,}8 \cdot 10^{-33}\,\mathrm{J}$. Pour des particules isolées, le record semble être celui de neutrons : des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm.

Curiosités et défis amusants sur les unités

Le fait de ne pas utiliser les unités du SI peut coûter cher. En 1999, la NASA a perdu un satellite sur Mars parce que certains programmeurs de logiciels avaient utilisé des unités impériales* à la place des unités du SI dans des lignes de code. En conséquence, Mars Climate Orbiter s'écrasa sur la planète, au lieu de graviter autour de celle-ci. La perte fut évaluée à 100 millions d'euros environ**.

* *

Le *gray* est la quantité de radioactivité qui dépose 1 J sur 1 kg de matière. Le *sievert* est l'unité de radioactivité adaptée aux êtres humains en pondérant chaque type de tissu humain à l'aide d'un facteur représentatif de l'impact que le rayonnement dépose sur celui-ci. Quatre à cinq sieverts constituent une dose létale pour les êtres humains. En comparaison, la radioactivité naturelle présente à l'intérieur du corps humain conduit à une dose de 0,2 mSv par an. Une radiographie moyenne aux rayons X engendre une
Réf. 265 radiation de 1 mSv, un scanner, 8 mSv.

* Des unités de mesure anglo-saxonnes. [N.D.T.]

** Ce récit ranima une vieille (et fausse) rumeur qui affirme que seuls trois pays dans le monde n'utilisent pas les unités du SI : le Libéria, les États-Unis et la Birmanie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 40 Quelques valeurs mesurées de puissances visibles (intensités lumineuses).

OBSERVATION	INTENSITÉ LUMINEUSE
Flamme de bougie	1 cd
Lampe de poche	2 cd
Feux de position d'une voiture	10 cd
Plein phare d'une voiture (avec réflecteur, centre du faisceau)	60 cd
Lampe de cinéma	1,5 kcd
Flash photographique	1 Mcd
Phare	2 Mcd
Les plus gros projecteurs	80 Mcd

* *

Vous êtes décontenancés par la candela ? La définition dit simplement que 683 cd = 683 lm/sr correspond à 1 W/sr. La candela est donc une unité de la puissance lumineuse par angle (solide), ou d'*intensité lumineuse*, mis à part qu'elle est corrigée pour s'ajuster à la sensibilité de l'œil : la candela mesure simplement la puissance *visible* par unité d'angle.

De manière similaire, 683 lm = 683 cd sr correspond à 1 W. Donc le lumen et le watt mesurent tous les deux de la puissance, ou du flux d'énergie, mais le lumen mesure uniquement la partie *visible* de la puissance ou flux énergétique. Cette différence est exprimée en insérant les qualificatifs « radiant » ou « lumineux » : ainsi, le watt mesure le flux *radiant*, tandis que le lumen mesure le flux *lumineux*.

Le facteur 683 est d'origine historique. Une chandelle ordinaire émet une intensité lumineuse d'environ une candela. Par conséquent, la nuit, une chandelle peut être vue jusqu'à une distance de 10 ou 20 kilomètres. Une ampoule à incandescence de 100 W produit 1 700 lm, et les diodes émettrices de lumière les plus brillantes environ 5 lm. Les projecteurs de cinéma produisent environ 2 Mlm, et les flashs les plus intenses, comme l'éclair, 100 Mlm.

Défi 557 e

L'*éclairement énergétique* de la lumière du soleil est d'environ 1 300 W/m^2 lors d'une journée ensoleillée. Par ailleurs, l'*éclairement lumineux* n'est que de 120 klm/m^2 = 120 klux ou 170 W/m^2. (Une journée d'été recouverte de nuages ou une journée d'hiver dégagée produit environ 10 klux. L'éclairement lumineux est principalement ce que nous appelons la « luminosité » dans la vie courante.) Ces nombres indiquent que la plupart de l'énergie du Soleil qui parvient à la Terre se situe en dehors du spectre visible.

Sur un glacier, près de la côte, sur le sommet d'une montagne, ou lors de conditions météorologiques particulières, la luminosité peut atteindre 150 klux. Les lampes les plus brillantes, celles utilisées pendant les opérations chirurgicales, produisent 120 klux. Les hommes ont besoin d'environ 30 lux pour une lecture confortable. Les musées sont souvent maintenus dans l'obscurité parce que les peintures à l'eau sont dégradées par la lumière au-delà de 100 lux, et les peintures à l'huile au dessus de 200 lux. La pleine lune produit 0,1 lux, et le ciel lors d'une nuit sombre sans lune, environ 1 mlux. Les yeux conservent leur aptitude à distinguer les couleurs quelque part entre 0,1 lux et 0,01 lux,

Réf. 266

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 41 Quelques valeurs mesurées d'éclairements lumineux.

OBSERVATION	ÉCLAIREMENT LUMINEUX
Pâle étoile	0,1 nlx
Sirius	10 µlx
Le phot (ancienne unité d'éclairement lumineux)	10 µlx
Jupiter	20 µlx
Pleine Lune	0,01 à 0,24 lx
La rue la nuit, faible trafic, faible éclairage	0,1 à 3 lx
La rue la nuit, fort trafic	10 à 30 lx
Pour la lecture	50 à 100 lx
Écran de cinéma	100 lx
Lieu de travail	0,2 à 5 klx
Journée nuageuse	1 klx
Journée ensoleillée	120 klx
Film dans un projecteur de cinéma	5 Mlx
Douloureux pour l'œil	100 Mlx

l'œil cesse de remplir sa fonction en deçà de 1 nlux. Les dispositifs techniques qui produisent des images dans l'obscurité, telles que les lunettes de vision nocturne, commencent à fonctionner à partir de 1 µlux. Par ailleurs, le corps humain lui-même *brille* à environ 1 plux, une valeur trop faible pour pouvoir être décelée par l'œil, mais facilement mesurable à l'aide d'appareils spécialisés. La source de cette émission reste toujours du domaine de la recherche.

* *

Les plus fortes intensités lumineuses atteignent plus de 10^{18} W/m^2, soit plus de 15 ordres de grandeur au dessus de l'intensité de la lumière du soleil. Elles sont produites par des focalisations très étroites de lasers pulsés. Le champ électrique de ces impulsions lumineuses est du même ordre que le champ situé à l'intérieur des atomes, un tel faisceau ionise par conséquent toute la matière qu'il rencontre. Réf. 267

* *

La *densité lumineuse* est une quantité qui est souvent utilisée par les spécialistes de la lumière. Son unité est 1 cd/m^2, que l'on désigne officieusement 1 Nit et abrégé 1 nt. Les yeux voient, uniquement avec les bâtonnets, de 0,1 µcd/m^2 à 1 mcd/m^2, ils voient avec les cônes simplement au-dessus de 5 cd/m^2, la perception est meilleure entre 100 et 50 000 cd/m^2, et ils deviennent complètement éblouis au-delà de 10 Mcd/m^2 : soit une étendue totale de 15 ordres de grandeur.

* *

La longueur de Planck est approximativement égale à la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à son aise (m = 80 kg, v = 0,5 m/s), ce mouvement Réf. 268

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est par conséquent appelé à juste titre la « promenade de Planck ».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain, à l'âge de dix jours environ.

* *

La seconde ne correspond plus à 1/86 400ème du jour, bien que ce fût le cas en l'an 1900. La Terre met maintenant environ 86 400,002 s pour effectuer une rotation, de telle sorte que le *Service international de la rotation terrestre* doit régulièrement introduire une seconde intercalaire pour s'assurer que le Soleil est à son plus haut niveau dans le ciel à midi tapante*. Le temps défini de cette manière est appelé *Temps Universel Coordonné*. La vitesse de rotation de la Terre varie également de manière irrégulière d'un jour à l'autre à cause des conditions météorologiques, la vitesse de rotation moyenne fluctue même entre l'hiver et l'été à cause des changements qui surviennent dans les calottes glaciaires polaires, et de surcroît cette moyenne diminue au cours du temps à cause du frottement engendré par les marées. La fréquence d'insertion de ces secondes intercalaires est par conséquent supérieure à une fois tous les 500 jours, et n'est pas constante dans le temps.

* *

Les quantités mesurées de la manière la plus précise dans la nature sont les fréquences de certains pulsars millisecondes**, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites, et la constante de Rydberg de l'*hydrogène atomique*, qui peuvent toutes être mesurées aussi précisément qu'est définie la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur finie de sa raie spectrale, ce qui restreint la précision accessible : cette limite est d'environ 14 chiffres.

* *

L'horloge la plus précise jamais réalisée, en utilisant des micro-ondes, possède une stabi-
Réf. 269 lité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 fut d'environ 10^{-15}, mais des valeurs tournant autour de 10^{-17} semblent
Réf. 270 rester du domaine du technologiquement possible. La précision des horloges est limitée par le bruit pour des brèves durées de mesure, et pour des longues durées de mesure par des biais, c'est-à-dire par des effets systématiques. La région de la plus forte stabilité dépend du type d'horloge utilisée, elle se situe généralement entre 1 ms pour des horloges optiques et 5 000 s pour des masers. Les pulsars sont le seul type d'horloge pour lequel cette région n'est pas encore déterminée, elle se situe vraisemblablement à plus de 20 années, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre leur découverte et l'instant où nous écrivons ces lignes.

* *

* Leur site Web sur hpiers.obspm.fr donne plus de précisions sur les particularités de ces insertions, comme sur maia.usno.navy.mil, l'un des quelques sites Web militaires utiles. Consultez aussi www.bipm.fr, le site du BIPM.

** Un tour d'horizon de ce travail fascinant en est donné par J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* **341**, pp. 117–134, 1992.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les durées les plus brèves qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules « élémentaires ». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été évaluée à moins de 10^{-23} s. De telles périodes sont mesurées en utilisant une chambre à bulles, dans laquelle la trace est photographiée. Pouvez-vous estimer quelle est la longueur de cette trajectoire ? (C'est une question trompeuse – si votre longueur ne peut pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

Réf. 271
Défi 558 s

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} années, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, soit 10^{32} années. Ces périodes sont donc beaucoup plus grandes que l'âge de l'univers, estimé à quatorze milliards d'années.

Réf. 272

* *

Les constantes fondamentales de la physique mesurées avec le moins de précision sont la constante de la gravitation G et la constante de couplage de l'interaction forte α_s. L'âge de l'univers et sa densité sont déterminés avec encore moins de précision (regardez le Tableau 44).

Page 315

* *

La précision des mesures de masse des solides est limitée par des effets simples tels que l'adsorption de l'eau. Pouvez-vous estimer la masse d'une monocouche d'eau – une couche ayant l'épaisseur d'une seule molécule – sur un métal pesant 1 kg ?

Défi 559 s

* *

Les variations des quantités sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3 000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont dorénavant en train d'être surpassés par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquence de 10^{-21} ont déjà été construits, et ils sont toujours en cours de perfectionnement.

Réf. 273
Réf. 274

* *

L'astronome suédois Anders Celsius (1701–1744) fixa initialement le point de congélation de l'eau à 100 degrés et le point d'ébullition à 0 degré. Cette échelle fut inversée par la suite. Cependant, l'histoire ne se termine pas là. Avec la définition officielle du kelvin et du degré Celsius, à la pression standard de 1 013,25 Pa, l'eau bout à 99,974 °C. Pouvez-vous expliquer pourquoi ce n'est plus 100 °C ?

Réf. 275
Défi 560 s

* *

Au cours du millénaire précédent, on avait coutume de mesurer l'énergie thermique en utilisant la *calorie* comme unité, notée cal. 1 cal est l'énergie nécessaire pour réchauffer 1 g d'eau de 1 K. Pour compliquer les choses, 1 kcal était souvent noté 1 Cal. (Nous parlions également de grande et de petite calorie.) 1 kcal vaut 4,1868 kJ.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Les unités du SI sont adaptées aux êtres humains : les valeurs du battement de cœur, de la taille humaine, du poids, de la température et de la quantité de substance d'un homme se rapprochent de la valeur unitaire à guère plus d'un couple d'ordres de grandeurs. Les unités du SI confirment donc (approximativement) ce que disait Protagoras il y a 25 siècles : « L'homme est la mesure de toutes choses ».

* *

Certains systèmes d'unités sont particulièrement mal adaptés aux hommes. Le plus infâme d'entre eux est la taille S des chaussures. C'est un nombre pur calculé ainsi :

$$\begin{aligned} S_{\text{France}} &= 1{,}5\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) \\ S_{\text{Europe centrale}} &= 1{,}5748\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) \\ S_{\text{Homme anglo-saxon}} &= 1{,}181\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) - 22 \end{aligned} \tag{103}$$

où l représente la longueur d'un pied et la correction de longueur dépend de l'entreprise de confection. De surcroît, la formule anglo-saxonne n'est pas valable pour les femmes et les enfants, où le premier facteur dépend, pour des raisons marketing, à la fois du fabricant et de la taille elle-même. Le standard ISO exige, de façon non surprenante, d'exprimer la longueur du pied en millimètres.

* *

Le tableau des préfixes du SI recouvre 72 ordres de grandeurs. Combien de préfixes supplémentaires seraient nécessaires ? Même une liste très longue n'incorporera qu'une partie infime de l'étendue infinie des possibilités. La Conférence Générale des Poids et Mesures devra-t-elle se poursuive éternellement, pour définir un nombre infini de préfixes du SI ? Pourquoi ?

Défi 561 s

* *

Le philosophe français Voltaire, après avoir rencontré Newton, publia l'histoire maintenant célèbre qui raconte que la correspondance entre la chute des objets et le mouvement de la Lune fut découverte par Newton lorsqu'il vit une pomme tomber d'un arbre. Plus d'un siècle plus tard, juste avant la Révolution Française, un jury de scientifiques décida de prendre comme unité de la force précisément celle exercée par la gravité sur une *pomme étalon*, et de la baptiser du nom de ce scientifique anglais. Après une étude approfondie, on trouva que la masse de la pomme étalon était de 101,9716 g, son poids fut donc appelé 1 newton. Depuis lors, les visiteurs du musée à Sèvres près de Paris ont eu la possibilité d'admirer le mètre étalon, le kilogramme étalon et la pomme étalon*.

* Pour être franc, c'est une blague : il n'existe aucune pomme étalon. Par contre, ce qui suit n'est *pas* une plaisanterie : des propriétaires de plusieurs pommiers en Grande-Bretagne et aux États-Unis prétendirent descendre, suite à un déracinement, de l'arbre original sous lequel Newton eut sont trait de génie. Des tests ADN ont même été réalisés pour décider s'ils dérivaient tous du même arbre. De façon non surprenante, le résultat a établi que l'arbre situé au MIT, contrairement à ceux de Grande-Bretagne, est un faux.

Réf. 276

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

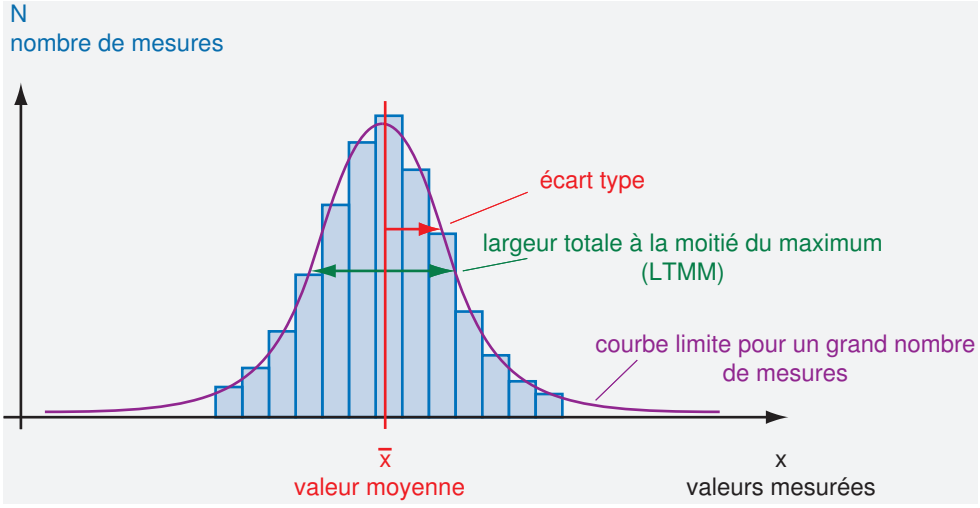


FIGURE 149 Une expérience de précision et sa distribution des mesures.

Précision et exactitude des mesures

Comme nous l'avons expliqué à la page 286, la *précision* exprime dans quelle mesure un résultat est bien reproduit lorsque l'évaluation est réitérée, l'*exactitude* est le degré de correspondance d'une mesure à la véritable valeur. Le manque de précision est dû à des *erreurs aléatoires* ou accidentelles, la meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer l'*écart-type*, généralement noté σ, qui est défini par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \,, \tag{104}$$

où $\bar{x}$ représente la moyenne des mesures x_i. (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule au lieu de n ?) Défi 562 s

Pour la plupart des expériences, la distribution des valeurs des mesures tend vers une loi normale, également appelée *loi de Laplace–Gauss*, à partir du moment où nous accroissons le nombre de mesures. La distribution, indiquée dans la Figure 149, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \,. \tag{105}$$

Le carré de l'écart type, σ^2, est également appelé la *variance*. Pour une loi gaussienne des valeurs de mesure, $2,35\sigma$ est la largeur totale de la courbe à la moitié du maximum. Défi 563 e

Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*, on ne peut généralement que les estimer, seulement. Cette estimation est souvent ajoutée aux erreurs aléatoires pour produire une erreur expérimentale *totale*, également parfois dénommée *incertitude totale*. Réf. 277

Les tableaux qui suivent fournissent les valeurs des constantes physiques et des propriétés des particules les plus importantes, en unités du SI et dans quelques autres unités courantes, comme on les trouve dans les sources de référence. Ces valeurs sont les Réf. 278

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

moyennes mondiales des meilleures mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les biais expérimentaux, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type dans les derniers chiffres, par exemple 0,31(6) signifie – *grosso modo* – $0,31 \pm 0,06$. En réalité, derrière chacun des nombres qui apparaissent dans les tableaux suivants se cache une longue histoire qu'il serait digne de conter, mais pour lesquelles nous n'avons pas suffisamment de place ici*.

Quelles sont les limites à l'exactitude et à la précision ? Il n'existe aucun procédé, même en principe, permettant de mesurer une longueur x jusqu'à une *précision* supérieure à environ 61 chiffres, parce que $\Delta x/x > l_{\mathrm{Pl}}/d_{\mathrm{horizon}} = 10^{-61}$. (Cela est-il également vrai pour la force ou pour le volume ?) Dans la dernière partie de notre texte, l'examen des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique.

Défi 564 pe
Page ??

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus strictes. Aucune machine imaginable ne peut mesurer des quantités avec une précision plus élevée que la mesure du diamètre de la Terre à une incertitude près égale à la longueur la plus petite jamais mesurée, soit 10^{-19} m environ, c'est-à-dire environ 26 chiffres de précision. En utilisant une limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1 000 m, on obtient une limite de 22 chiffres. Si, comme nous l'avons prédit plus haut, les mesures du temps atteignent vraiment 17 chiffres de précision, alors elles seront proches de la limite pratique, parce que mis à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire : le coût. En réalité, un chiffre supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent qu'il faille un chiffre supplémentaire dans le coût de l'équipement.

Constantes physiques fondamentales

Réf. 278

En principe, toutes les propriétés quantitatives de la matière peuvent être calculées avec la théorie quantique. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques peuvent être prédites en faisant appel aux valeurs des constantes qui suivent, en utilisant les équations du modèle standard de la physique des hautes énergies.

TABLEAU 42 Constantes physiques fondamentales.

Quantité	Symbole	Valeur unités SI	Incert.[a]
nombre de dimensions d'espace-temps		3 + 1	0 [b]
vitesse de la lumière dans le vide[c]	c	299 792 458 m/s	0
perméabilité magnétique du vide[c]	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	0
		= 1,256 637 061 435 ... μH/m	0
permittivité diélectrique du vide[c]	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8,854 187 817 620 ... pF/m	0
constante de Planck originale	h	$6,626\,068\,76(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
constante de Planck réduite	$\hbar$	$1,054\,571\,596(82) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
charge du positron	e	0,160 217 646 2(63) aC	$3,9 \cdot 10^{-8}$

* Certains de ces récits peuvent être retrouvés dans l'ouvrage de N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, à partir duquel sont tirés les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une magnifique introduction en est donnée par J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero : Frontiers of Physics*, Freeman, 1988.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.[a]
constante de Boltzmann	k	$1{,}380\,650\,3(24)\cdot 10^{-23}$ J/K	$1{,}7\cdot 10^{-6}$
constante gravitationnelle	G	$6{,}673(10)\cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1{,}5\cdot 10^{-3}$
constante de couplage gravit.	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2{,}076(3)\cdot 10^{-43}$ s^2/kg m	$1{,}5\cdot 10^{-3}$
constante de structure fine[d],	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	$1/137{,}035\,999\,76(50)$	$3{,}7\cdot 10^{-9}$
constante de couplage e.m.	$= g_{\text{em}}(m_e^2c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,533(27)$	$3{,}7\cdot 10^{-9}$
constante de couplage de Fermi[d],	$G_F/(\hbar c)^3$	$1{,}166\,39(1)\cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$8{,}6\cdot 10^{-6}$
constante de couplage faible	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	$1/30{,}1(3)$	$1\cdot 10^{-2}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	$0{,}231\,24(24)$	$1{,}0\cdot 10^{-3}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W$ (enveloppe) $= 1-(m_W/m_Z)^2$	$0{,}2224(19)$	$8{,}7\cdot 10^{-3}$
constante de couplage fort[d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	$0{,}118(3)$	$25\cdot 10^{-3}$

a. Incertitude : écart-type des erreurs de mesure.
b. De 10^{-19} m et jusqu'à 10^{26} m, uniquement.
c. Définition numérique de la constante. (La permittivité diélectrique du vide est aussi appelée constante électrique et la perméabilité du vide, constante magnétique [N.D.T.].)
d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion de $Q^2 = m_e^2c^2$, ce qui est la valeur la plus petite possible. Pour des transferts d'impulsion plus élevés elle possède des valeurs plus grandes, par exemple $g_{\text{em}}(Q^2 = M_W^2c^2) \approx 1/128$. La constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs supérieures pour des transferts d'impulsion moins importants, par exemple $\alpha_s(34\,\text{GeV}) = 0{,}14(2)$.

Page ??

Pourquoi toutes ces constantes possèdent-elles les valeurs qu'elles ont ? La réponse est différente dans chacune des situations. Pour toute constante possédant une dimension, tel que le quantum d'action $\hbar$, la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1{,}054\cdot 10^{-34}$ Js à cause de la définition du SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante dimensionnelle n'est pas plus grande ni plus petite nous oblige toujours à comprendre l'origine de certains nombres sans dimension qui donnent le rapport entre la constante et l'unité naturelle correspondante. La compréhension des tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, de la durée des processus moléculaires et atomiques, ou de la masse des noyaux et des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clé de la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et ainsi de toutes les constantes sans dimension. L'histoire des rapports les plus importants est contée dans la partie qui conclut cette aventure.

Les constantes fondamentales engendrent les observations utiles suivantes, de haute précision.

TABLEAU 43 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	$376{,}730\,313\,461\,77\ldots\ \Omega$	0
nombre d'Avogadro	N_A	$6{,}022\,141\,99(47)\cdot 10^{23}$	$7{,}9\cdot 10^{-8}$
constante de Rydberg[a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$10\,973\,731{,}568\,549(83)\,\text{m}^{-1}$	$7{,}6\cdot 10^{-12}$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 916 96(28) µS	$3,7 \cdot 10^{-9}$
quantum du flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 636(81) pWb	$3,9 \cdot 10^{-8}$
rapport de fréquence de Josephson	$2e/h$	483,597 898(19) THz/V	$3,9 \cdot 10^{-8}$
constante de von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 572(95) Ω	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 008 99(37) yJ/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 4925(11) GHz/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 m_e c^2$	2,817 940 285(31) fm	$1,1 \cdot 10^{-8}$
longueur d'onde de Compton	$\lambda_c = h/m_e c$	2,426 310 215(18) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
de l'électron	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0,386 159 264 2(28) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
rayon de Bohr[a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 720 83(19) pm	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	5,050 783 17(20) $\cdot 10^{-27}$ J/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rapport de masse proton–électron	m_p/m_e	1 836,152 667 5(39)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
constante de Stefan–Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,704 00(40) nW/m^{2}K^4	$7,0 \cdot 10^{-6}$
constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{max} T$	2,897 768 6(51) mmK	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante de conversion de bits en entropie		10^{23} bit = 0,956 994 5(17) J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
contenu énergétique du TNT		de 3,7 à 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Certaines propriétés générales de la nature sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, pouvez-vous déterminer si une quelconque propriété de l'Univers lui-même est listée ?)

Défi 565 s

TABLEAU 44 Constantes astrophysiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante gravitationnelle	G	6,672 59(85) $\cdot 10^{-11}$ m^3/kg s^2
constante cosmologique	Λ	env. $1 \cdot 10^{-52}$ m^{-2}
année tropicale en 1900[a]	a	31 556 925,974 7 s
année tropicale en 1994	a	31 556 925,2 s
jour sidéral moyen	d	$23^h 56' 4,090\,53''$
année-lumière	al	9,460 528 173 … Pm
unité astronomique[b]	ua	149 597 870,691(30) km
parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
âge de l'Univers[c]	t_0	4,333(53) $\cdot 10^{17}$ s = 13,73(0,17) $\cdot 10^9$ a
(déterminé par l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
âge de l'Univers[c]	t_0	3,5(4) $\cdot 10^{17}$ s = 11,5(1,5) $\cdot 10^9$ a, au plus
(déterminé par la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la mécanique quantique)		
constante de Hubble[c]	H_0	2,3(2) $\cdot 10^{-18}$ s^{-1} = 0,73(4) $\cdot 10^{-10}$ a^{-1}
	$H_0 = h_0 \cdot 100$ km/sMpc = $h_0 \cdot 1{,}0227 \cdot 10^{-10}$ a^{-1}	

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante de Hubble réduite[c]	h_0	0,71(4)
paramètre de décélération	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	$-0,66(10)$
distance de l'horizon de l'Univers[c]	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26}$ m = 13,0(2) Gpc
topologie de l'Univers		inconnue
nombre de dimensions spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
densité critique	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
de l'Univers		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
paramètre de densité (totale)[c]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
paramètre de densité baryonique[c]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
paramètre de densité	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
de matière noire froide[c]		
paramètre de densité des neutrinos[c]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0,001 à 0,05
paramètre de densité	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
de l'énergie sombre[c]		
paramètre de l'équation d'état	$w = p_X/\rho_X$	$-1,0(2)$
de l'énergie sombre		
masse baryonique	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27}$ kg
densité baryonique		0,25(1) /m^3
densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28}$ kg/m^3
étoiles dans l'Univers	n_e	$10^{22\pm1}$
baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81\pm1}$
température du fond diffus	T_0	2,725(1) K
micro-onde[d]		
photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31}$ kg/m^3
densité de photons		410,89 /cm^3 ou 400 /cm^3 $(T_0/2,7\,\mathrm{K})^3$
amplitude des perturbations	$\sqrt{S}$	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
de densité		
amplitude des ondes	$\sqrt{T}$	$< 0,71\sqrt{S}$
gravitationnelles		
fluctuations de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
indice spectral scalaire	n	0,93(3)
variation de l'indice spectral	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	-0,03(2)
longueur de Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35}$ m
temps de Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44}$ s
masse de Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 µg
nombre d'instants dans l'histoire[c]	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
points de l'espace-temps	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot$	$10^{244\pm1}$
dans l'horizon[c]	(t_0/t_{Pl})	
masse dans l'horizon	M	$10^{54\pm1}$ kg

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

a. Définition de la constante, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Rappelez-vous : π secondes représentent à peu près un nanosiècle.) La valeur de 1990 compte environ 0,7 s de moins, correspondant à un ralentissement d'approximativement 0,2 ms/a. (Faites attention : pourquoi ?) Il existe même une formule empirique pour évaluer la variation de la durée de l'année au cours du temps.

Défi 566 s
Réf. 279

b. Distance moyenne Terre–Soleil. Cette précision vraiment stupéfiante de 30 m résulte des durées moyennes de propagation des signaux envoyés par les navettes spatiales Viking en orbite et les atterrisseurs martiens, récoltées durant une période de plus de vingt ans.

c. L'indice 0 représente les valeurs d'aujourd'hui.

d. Ce rayonnement fut produit lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3 000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui déclenchèrent la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4\,\mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6}\ T_0$.

Page 210

Soyez vigilants : dans l'ultime partie de cet ouvrage on montre qu'un grand nombre des constantes du Tableau 44 *ne* sont *pas* des quantités physiquement raisonnables. Elles doivent être considérées avec beaucoup de circonspection. Les constantes plus spécifiques données dans le tableau qui suit sont toutes raisonnables, cependant.

TABLEAU 45 Constantes astronomiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
masse de la Terre	$M_{♁}$	$5{,}972\,23(8) \cdot 10^{24}$ kg
longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{♁} = 2GM/c^2$	8,870(1) mm
rayon de la Terre, à l'équateur[a]	$R_{♁\text{eq}}$	6 378,1367(1) km
rayon de la Terre, aux pôles[a]	$R_{♁\text{p}}$	6 356,7517(1) km
distance Équateur–pôle[a]		10 001,966 km (moyenne)
aplatissement de la Terre[a]	$e_{♁}$	1/298, 25231(1)
densité moyenne de la Terre	$\rho_{♁}$	5,5 Mg/m^3
âge de la Terre	$T_{♁}$	4,55 Ga = 143 Ps
rayon de la Lune	$R_{☾\,\text{v}}$	1 738 km dans la direction de la Terre
rayon de la Lune	$R_{☾\,\text{h}}$	1 737,4 km dans les deux autres directions
masse de la Lune	$M_{☾}$	$7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg
distance moyenne de la Lune[b]	$d_{☾}$	384 401 km
distance de la Lune au périgée[b]		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
distance de la Lune à l'apogée[b]		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
taille angulaire de la Lune[c]		en moyenne $0,5181° = 31,08'$, minimum $0,49°$, maximum - ligne la plus courte $0,55°$
densité moyenne de la Lune	$\rho_{☾}$	3,3 Mg/m^3
masse du Soleil	$M_{☉}$	$1{,}988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
longueur gravitationnelle du Soleil	$l_{☉} = 2GM_{☉}/c^2$	2,953 250 08 km
luminosité du Soleil	$L_{☉}$	384,6 YW
rayon solaire équatorial	$R_{☉}$	695,98(7) Mm

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Quantité	Symbole	Valeur
taille angulaire du Soleil		0,53° en moyenne ; minimum le quatre juillet (aphélie) 1888″, maximum le quatre janvier (périhélie) 1952″
densité moyenne du Soleil	$\rho_\odot$	1,4 Mg/m^3
distance moyenne du Soleil	UA	149 597 870,691(30) km
âge du Soleil	$T_\odot$	4,6 Ga
vitesse solaire autour du centre de la galaxie	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
vitesse solaire par rapport au fond diffus cosmologique	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
distance au centre galactique		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
âge de la Voie lactée		13,6 Ga
taille de la Voie lactée		env. 10^{21} m ou 100 kal
masse de la Voie lactée		10^{12} masses solaires, env. $2 \cdot 10^{42}$ kg
masse de Jupiter	$M_{♃}$	$1{,}90 \cdot 10^{27}$ kg
rayon jovien équatorial	$R_{♃}$	71,398 Mm
rayon jovien polaire	$R_{♃}$	67,1(1) Mm
distance moyenne de Jupiter au Soleil	$D_{♃}$	778 412 020 km
galaxie connue la plus éloignée	1835 IR1916	$13{,}2 \cdot 10^9$ al = $1{,}25 \cdot 10^{26}$ m, redshift 10

a. La forme de la Terre est décrite de la manière la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation largement développée de ses contextes et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union Géodésique et Géophysique Internationale révisa les données en l'an 2000. Les rayons et l'aplatissement donnés ici sont ceux du système de marée « mean tide system ». Ils diffèrent de 0,7 m environ de ceux du système de marée « zero tide system » et de d'autres systèmes. Les particularités de ce domaine représentent une science à part.
b. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, consultez la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html et les autres pages du même site.
c. Les angles sont définis comme suit : 1 degré = 1° = π/180 rad, 1 (première) minute d'arc = 1′ = 1°/60, 1 seconde (minute) d'arc = 1″ = 1′/60. Les anciennes unités « tierce minute d'arc » et « quarte minute d'arc », valant chacune 1/60e de la précédente, ne sont plus utilisées. (« Minute » signifiait à l'origine « très petit », comme c'est toujours le cas dans l'anglais moderne.)

Nombres utiles

π	$3,14159\,26535\,89793\,23846\,26433\,83279\,50288\,41971\,69399\,37510_5$
e	$2,71828\,18284\,59045\,23536\,02874\,71352\,66249\,77572\,47093\,69995_9$
γ	$0,57721\,56649\,01532\,86060\,65120\,90082\,40243\,10421\,59335\,93992_3$
ln 2	$0,69314\,71805\,59945\,30941\,72321\,21458\,17656\,80755\,00134\,36025_5$
ln 10	$2,30258\,50929\,94045\,68401\,79914\,54684\,36420\,76011\,01488\,62877_2$
$\sqrt{10}$	$3,16227\,76601\,68379\,33199\,88935\,44432\,71853\,37195\,55139\,32521_6$

Réf. 280

Si le nombre π est *normal*, c'est-à-dire si les chiffres et les combinaisons de chiffres

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dans ses développements décimaux apparaissent tous avec la même fréquence limite, alors tous les textes qui ont été écrits ou qui vont l'être, de même que tous les mots qui ont été prononcés ou qui vont l'être, peuvent être retrouvés de manière codée dans ses suites. La propriété de normalité n'a pas encore été démontrée, bien qu'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la science soit encodée dans le simple cercle ? Non. Cette propriété n'a rien de particulier : elle s'applique également au nombre 0, 1234567891011121314151617181920 21.... et de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples ?

Défi 567 s

Par ailleurs, dans le graphe de la fonction exponentielle e^x, le point $(0,1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez colorier en bleu tous les points situés sur le plan et ayant deux coordonnées rationnelles, ce plan paraîtrait quasiment bleu. Néanmoins, le graphe passe par un de ces points seulement et parvient à éviter tous les autres.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Annexe C

SOURCES D'INFORMATION SUR LE MOUVEMENT

> Nul lieu n'offre de la vanité des espérances humaines une preuve plus frappante qu'une bibliothèque publique.
>
> Samuel Johnson

> Dans une société de consommation il y a inévitablement deux formes d'esclavage : les prisonniers de la dépendance et les prisonniers de l'envie.
>
> Ivan Illich*

Dans ce texte, on présente les ouvrages de référence et d'introduction aux omaines attenants, en note de bas de page. Les bibliographies en fin de chaque chapitre rassemblent les ressources générales afin de satisfaire une curiosité plus pointue à propos de ce qui est traité dans cette ascension montagneuse. Toutes les citations peuvent également être retrouvées en regardant dans l'index, au nom de l'auteur concerné. Pour obtenir des informations complémentaires, les bibliothèques et Internet peuvent être utiles.

Dans une bibliothèque, les articles de revue de la recherche en cours apparaissent dans des périodiques tels que *Reviews of Modern Physics*, *Reports on Progress in Physics*, *Contemporary Physics* et *Advances in Physics*. On trouve des excellentes introductions pédagogiques dans l'*American Journal of Physics*, l'*European Journal of Physics* et *Physik in unserer Zeit*. Une autre ressource très utile est *Living Reviews in Relativity*, consultable sur www.livingreviews.org.

Des synthèses sur les orientations de la recherche apparaissent occasionnellement dans des magazines tels que *Physics World*, *Physics Today*, *Europhysics Journal*, *Physik Journal* et *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde*. Pour une vue d'ensemble de toutes les sciences, les meilleures sources sont les revues *Nature*, *New Scientist*, *Naturwissenschaften*, *La Recherche* et *Science News*, qui est bon marché mais excellent.

Les articles de recherche sont principalement édités dans *Physics Letters B*, *Nuclear Physics B*, *Physical Review D*, *Physical Review Letters*, *Classical and Quantum Gravity*, *General Relativity and Gravitation*, *International Journal of Modern Physics* et *Modern Physics Letters*. On retrouve les résultats les plus récents et les conjectures spéculatives dans les comptes-rendus de conférence, tels que les *Nuclear Physics B Supplements*. Des articles de recherche apparaissent également dans *Fortschritte der Physik*, *Zeitschrift für*

* Ivan Illich (n. Vienne 1926, d. Brême 2002), fut un théologien, un penseur social et politique autrichien.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 46 La structure de l'archive de prépublications électroniques Arxiv pour la physique et les disciplines associées sur fr.arxiv.org.

DISCIPLINE	ABRÉVIATION
relativité générale et cosmologie quantique	gr-qc
astrophysique	astro-ph
physique expérimentale nucléaire	nucl-ex
physique théorique nucléaire	nucl-th
physique théorique des hautes énergies	hep-th
physique numérique des hautes énergies	hep-lat
physique phénoménologique des hautes énergies	hep-ph
physique expérimentale des hautes énergies	hep-ex
mécanique quantique	quant-ph
physique générale	physics
physique de la matière condensée	cond-mat
sciences non linéaires	nlin
physique mathématique	math-ph
mathématiques	math
informatique théorique	CoRR
biologie quantitative	q-bio

Pour recevoir des prépublications électroniques par courriel, envoyez un message électronique à une adresse de la forme gr-qc@arxiv.org (ou l'abréviation correspondante à la place de « gr-qc »), avec un objet composé simplement du mot « help », sans les guillemets.

Physik C, *La Rivista del Nuovo Cimento*, *Europhysics Letters*, *Communications in Mathematical Physics*, *Journal of Mathematical Physics*, *Foundations of Physics*, *International Journal of Theoretical Physics* et *Journal of Physics G*. Il existe aussi le *New Journal of Physics*, purement électronique, qui est consultable sur le site Web www.njp.org.

Les articles sur la description du mouvement sans le temps ni l'espace, qui sont apparus *après* que ce texte soit publié peuvent être trouvés via le *Scientific Citation Index*. Il est publié sous forme imprimée et sous forme de disque compact, et nous permet de rechercher toutes les publications qui citent un article donné. Ensuite, en utilisant le bimensuel *Physics Abstracts*, qui existe, lui aussi, à la fois sous forme papier et électronique, vous pouvez consulter le résumé de l'article et vérifier s'il est intéressant.

Mais la manière la plus efficace et la plus simple de rester en contact avec la recherche en cours sur le mouvement reste de loin l'usage d'*Internet*, la toile informatique mondiale. Pour quiconque ayant un ordinateur personnel connecté à une prise téléphonique, la majorité des articles de physique théorique est disponible gratuitement, sous la forme de *prépublications électroniques*, c'est-à-dire avant leur publication officielle et avant contrôle par un jury, sur le site Web fr.arxiv.org. Des détails sont fournis dans le Tableau 46. Un service permettant de retrouver des prépublications qui en citent une autre antérieure donnée, est également disponible.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Durant la dernière décennie du vingtième siècle, Internet s'est étendu à une combinaison de bibliothèque, de magasin de médias, de plateforme de discussion, de boutique en ligne, de collection de brochures et de passe-temps. Aujourd'hui, le commerce, la publicité et – de façon déplorable – les crimes de toutes sortes font également partie intégrante du Web. À l'aide d'un ordinateur personnel, d'un modem et d'un navigateur libre, nous pouvons consulter des informations situées dans des millions de pages de documents. Les diverses parties de ces documents sont localisées dans de nombreux ordinateurs répartis dans le monde, mais l'utilisateur final n'a pas besoin de s'en soucier*.

Pour commencer à surfer sur le Web, demandez à un ami qui connaît**. Rechercher sur le Web des auteurs, des organisations, des ouvrages, des publications, des sociétés ou de simples mots-clés en utilisant des moteurs de recherche peut vite se révéler être une expérience efficace ou une perte de temps. Une sélection des sites intéressants est donnée ci-dessous.

TABLEAU 47 Quelques sites intéressants sur le World Wide Web.

SUJET	ADRESSE DU SITE WEB OU « URL »
Sujets généraux	
Wikipédia	fr.wikipedia.org
Moteurs de recherche d'information	www.altavista.com www.metager.de www.google.fr

* Il y a plusieurs décennies, le livre provoquant d'IVAN ILLICH, *Deschooling Society*, Harper & Row, 1971, listait quatre ingrédients fondamentaux pour tout système d'éducation :

1. l'accès aux *ressources* nécessaires pour l'apprentissage, c'est-à-dire les livres, les accessoires, les examens, etc. à un prix abordable pour quiconque, à n'importe quel moment de sa vie ;

2. pour tous ceux qui veulent apprendre, établir un contact avec des *camarades* dans la même situation d'apprentissage, pour pouvoir discuter, confronter, coopérer et être en compétition ;

3. établir un contact avec des *aînés*, c'est-à-dire des professeurs, pour leur surveillance et leur critique envers ceux qui apprennent ;

4. établir des échanges entre les étudiants et les *acteurs* du domaine d'intérêt, de telle sorte que ces derniers peuvent être des modèles pour les premiers. Par exemple, il devrait y avoir la possibilité d'écouter des musiciens professionnels et de lire l'œuvre d'écrivains spécialistes. Cela donne aussi aux acteurs la possibilité de partager, de mettre en avant et d'utiliser leurs compétences.

Illich développe l'idée que si un tel système était informel – il l'appelle alors un « réseau d'apprentissage » ou « réseau d'opportunités » – il serait supérieur aux institutions formelles, financées par l'état, comme les écoles conventionnelles, en ce qui concerne le développement d'êtres humains mûrs. Ces idées sont approfondies dans ses travaux ultérieurs, *Deschooling Our Lives*, Penguin, 1976, et *Tools for Conviviality*, Penguin, 1973.

Aujourd'hui, n'importe quel ordinateur connecté fournit un ou plusieurs services parmi les suivants : le *courriel* (messagerie électronique), le FTP (transfert de fichier vers et depuis un autre ordinateur), accès au système *UseNet* (les groupes de discussion sur des sujets spécifiques, telle que la physique des particules), et le puissant *World Wide Web*. (On peut dire approximativement que chacun de ceux-ci incluent ceux d'avant.) D'une manière quelque peu inattendue, toutes ces facilités d'Internet l'ont transformé en l'épine dorsale du « réseau d'opportunités » mentionné par Illich. Cependant, comme dans toute école, le fait qu'Internet fournisse un véritable réseau d'apprentissage est fortement lié à la discipline de l'utilisateur.

** Il est également possible d'utiliser à la fois Internet et de télécharger des fichiers par FTP à l'aide du courriel seulement. Mais les outils changent trop souvent pour en fournir ici un guide stable. Demandez à un ami.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

SUJET	ADRESSE DU SITE WEB OU « URL »
	www.yahoo.fr
Archives des groupes de discussion	groups.google.fr
Foires aux questions sur la physique et d'autres sujets	www.faqs.org
Bibliothèques en ligne	www.konbib.nl
	portico.bl.uk
	www.theeuropeanlibrary.org
	www.hero.ac.uk/uk/niss/niss_library4008.cfm
	www.bnf.fr
	www.grass-gis.de/bibliotheken
	www.loc.gov
Physique	
Recherche, prépublications électroniques	fr.arxiv.org – voir la page 321
	www.slac.stanford.edu/spires
Données sur les particules	pdg.web.cern.ch/pdg
Physics news, hebdomadaire	www.aip.org/physnews/update
Journal de physique, quotidien	http://www.innovations-report.de/berichte/berichte_liste.php?show=18
Problèmes de physique de Yakov Kantor	star.tau.ac.il/QUIZ
Problèmes de physique de Henry Greenside	www.phy.duke.edu/~hsg/physics-challenges/challenges.html
La « question de la semaine » en physique	www.physics.umd.edu/lecdem/outreach/QOTW/active
« Petits problèmes » de physique	www.nyteknik.se/miniproblemet
Site officiel des unités du SI	www.bipm.fr
Conversion d'unités	www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units.html
« Demandez aux experts »	www.sciam.com/askexpert_directory.cfm
Résumés d'articles de journaux de physique	www.osti.gov
Science News	www.sciencenews.org
Lauréats du Prix Nobel	www.nobel.se/physics/laureates
Portraits de physiciens	www.if.ufrj.br/famous/physlist.html
Journal sur la gravitation	www.phys.lsu.edu/mog/
Living Reviews in Relativity	www.livingreviews.org
Informations sur la relativité	math.ucr.edu/home/baez/relativity.html
Simulations et films relativistes	www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~weiskopf

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

SUJET	ADRESSE DU SITE WEB OU « URL »
Organismes de physique	www.cern.ch
	www.hep.net
	www.nikhef.nl
	www.het.brown.edu/physics/review/index.html
Livres de physique sur le Web	www.plasma.uu.se/CED/Book
	www.biophysics.org/education/resources.htm
	www.lightandmatter.com
	www.motionmountain.eu
Trois magnifiques ensembles de notes françaises sur la mécanique classique et la physique des particules	feynman.phy.ulaval.ca/marleau/notesdecours.htm
L'excellent *Radical Freshman Physics* de David Raymond	www.physics.nmt.edu/~raymond/teaching.html
Notes de cours de physique du MIT	ocw.mit.edu/OcwWeb/web/courses/courses/index.htm#Physics
Notes de conférences en physique en allemand et en anglais	www.akleon.de
« World lecture hall »	www.utexas.edu/world/lecture
Formules et données pour l'ingénieur	www.efunda.com
La Science à l'école	www.wissenschaft-schulen.de
Mathématiques	
« Math forum » collection de ressources sur Internet	mathforum.org/library
Biographies de mathématiciens	www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/BiogIndex.html
Le problème de maths de la semaine de l'Université Purdue	www.math.purdue.edu/academics/pow
Le problème de maths de la semaine du Macalester College	mathforum.org/wagon
Formules mathématiques	dlmf.nist.gov
Fonctions	functions.wolfram.com
Intégration analytique	www.integrals.com
« Weisstein's World of Mathematics »	mathworld.wolfram.com
Curiosités	
Minéralogie	webmineral.com
	www.mindat.org
ESA	sci.esa.int

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

SUJET	ADRESSE DU SITE WEB OU « URL »
NASA	www.nasa.gov
Hubble, télescope spatial	hubble.nasa.gov
Sloan Digital Sky Survey	skyserver.sdss.org
Le « miroir cosmique »	www.astro.uni-bonn.de/~dfischer/mirror
Simulateur du Système solaire	space.jpl.nasa.gov
Satellites observables	liftoff.msfc.nasa.gov/RealTime/JPass/20
« Astronomy picture of the day »	antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html
La Terre vue de l'espace	www.visibleearth.nasa.gov
From Stargazers to Starships	www.phy6.org/stargaze/Sintro.htm
Données solaires actualisées	www.n3kl.org/sun
Illusions d'optique	www.sandlotscience.com
Bandes dessinées scientifiques de Jean-Pierre Petit	www.jp-petit.org
Jouets en physique	www.e20.physik.tu-muenchen.de/~cucke/toylinke.htm
Humour en physique	www.dctech.com/physics/humor/biglist.php
Littérature sur la magie	www.faqs.org/faqs/magic-faq/part2
Surfaces algébriques	www.mathematik.uni-kl.de/~hunt/drawings.html
Confection d'avions en papier	www.pchelp.net/paper_ac.htm www.ivic.qc.ca/~aleexpert/aluniversite/klinevogelmann.html
Petits hélicoptères volants	pixelito.reference.be
Horloge de dix mille ans	www.longnow.org
Le « Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte »	www.gdnae.de
Pseudo-science	suhep.phy.syr.edu/courses/modules/PSEUDO/pseudo_main.html
Cinglés	www.crank.net
Citations mathématiques	math.furman.edu/mwoodard/~mquot.html
Le « World Question Center »	www.edge.org/questioncenter.html
Plagiats	www.plagiarized.com
Canulars	www.museumofhoaxes.com

Voulez-vous étudier la physique sans véritablement vous rendre à l'université ? De nos jours il est possible de le faire via la messagerie électronique et Internet, en allemand, à l'université de Kaiserslautern*. Dans un avenir proche, un projet à l'échelle du territoire de la Grande-Bretagne devrait permettre la même chose pour les étudiants anglophones. En guise d'introduction, utilisez la dernière version de ce texte de physique !

> « Das Internet ist die offenste Form der geschlossenen Anstalt**. »
>
> Matthias Deutschmann

* Consultez le site Web www.fernstudium-physik.de.

** « Internet est la forme la plus ouverte d'institution fermée. »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

« Si tacuisses, philosophus mansisses*. »
D'après Boèce.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* « Si tu t'étais tu, tu serais resté un philosophe. » D'après l'histoire que Boèce conte dans *Consolation de la philosophie*, 2.7, 67 ff.

BIBLIOGRAPHIE

« Aiunt enim multum legendum esse, non multa. »
Pline l'Ancien, *Epistulae*.*

1 Pour un historique des sciences pendant l'Antiquité, voir Lucio Russo, *La rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli 1996, également disponible dans plusieurs autres langues. Cité en page 14.

2 Un aperçu des illusions sur le mouvement peut être consulté sur l'excellent site Web http://www.michaelbach.de/ot/. Cité en page 15.

3 Un magnifique livre expliquant la physique et ses nombreuses applications dans la nature et la technologie de manière vivante et exhaustive : Paul G. Hewitt & John Suchocki & Leslie A. Hewitt, *Conceptual Physical Science*, Bejamin-Cummings, 1999.

Un ouvrage célèbre pour sa passion et sa curiosité est celui-ci : Richard P. Feynman & R. B. Leighton & M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, 1977.

On peut en apprendre énormément sur le mouvement dans les livres de casse-tête. Un des meilleurs est la collection bien organisée de problèmes admirables qui ne nécessitent aucune mathématique, rédigée par Jean-Marc Lévy-Leblond, *La physique en questions – mécanique*, Vuibert, 1998.

Un autre recueil excellent d'énigmes se trouve dans Yakov Perelman, *Oh, la physique*, Dunod, 2000, une traduction de l'original russe.

Le livre suivant est également une merveilleuse compilation de problèmes : W. G. Rees, *Physics by Example : 200 Problems and Solutions*, Cambridge University Press, 1994.

Un bon historique des idées en physique est exposé dans l'excellent ouvrage de David Park, *The How and the Why*, Princeton University Press, 1988.

On trouve une admirable introduction à la physique dans Robert Pohl, *Pohl's Einführung in die Physik*, Klaus Lüders & Robert O. Pohl editors, Springer, 2004, en deux volumes avec CD. C'est une nouvelle édition d'un livre vieux de plus de 70 ans, mais sa qualité pédagogique, en particulier concernant le côté expérimental de la physique, est sans égale. Cité aux pages 14, 90, 150 et 223.

4 Un principe bien connu en sciences sociales stipule que, étant donné une question, pour chaque réponse possible, aussi mystérieuse qu'elle puisse paraître, il y a un individu – et souvent même un groupe tout entier – qui la tient pour vraie. Nous avons simplement besoin de compulser la littérature (ou Internet) pour en avoir la confirmation.

* « Lisez beaucoup, mais pas n'importe quoi. » Ep. 7, 9, 15. Gaius Plinius Secundus (n. Novum Comum 23/4, d. éruption du Vésuve 79), auteur romain, notamment célèbre pour son œuvre scientifique majeure et monumentale, *Histoire naturelle*, qui a été traduite et est restée la référence principale durant presque 2 000 ans.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

À propos des comportements grégaires en général, consultez R. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, Harper Collins, 1984. La diffusion et l'acceptation des idées, comme celles de la physique, sont également des exemples de la coopération humaine, avec tous les risques potentiels et les défauts qu'elle contient. Cité en page 16.

5 Tous les textes connus de Parménide et d'Héraclite peuvent être trouvés dans Jean-Paul Dumont, Les écoles présocratiques, Folio-Gallimard, 1988. Les visions sur l'inexistence du mouvement ont également été avancées par des auteurs beaucoup plus récents et beaucoup plus contestables, comme Berkeley en 1710. Cité en page 16.

Page ??

6 Un exemple de la perplexité occasionnée par les idées de Zénon est donné par William McLaughlin, Resolving Zeno's paradoxes, *Scientific American* pp. 66–71, Novembre 1994. Le véritable argument ne concernait pas une main qui donnait une claque sur la joue, mais plutôt une flèche atteignant sa cible. Consultez aussi Réf. 44. Cité en page 16.

7 Le texte complet de *La Beauté* et les autres poèmes tirés des *Fleurs du mal*, un des meilleurs ouvrages de poésie jamais écrits, peuvent être lus sur le site Web http://hypermedia.univ-paris8.fr/bibliotheque/Baudelaire/Spleen.html. Cité en page 17.

8 Le texte le plus célèbre est Jearl Walker, *The Flying Circus of Physics*, Wiley, 1975. Pour des conséquences physiques plus captivantes dans notre vie quotidienne, lisez Erwein Flachsel, *Hundertfünfzig Physikrätsel*, Ernst Klett Verlag, 1985. Ce livre cite également plusieurs énigmes d'horloges, dans les énigmes numéros 126 à 128. Cité en page 18.

9 Une introduction concise et instructive à l'histoire de la physique classique est fournie dans le premier chapitre du livre de F. K. Richtmeyer, E. H. Kennard & J. N. Cooper, *Introduction to Modern Physics*, McGraw–Hill, 1969. Cité en page 18.

10 Un bon tour d'horizon sur les arguments utilisés pour démontrer l'existence de Dieu à partir du mouvement est donné par Michael Buckley, *Motion and Motion's God*, Princeton University Press, 1971. L'intensité des luttes qui firent rage autour de ces tentatives avortées constitue un des chapitres tragiques de l'histoire. Cité en page 19.

11 Thomas d'Aquin, *Somme Théologique* ou *Summa Theologica*, 1265–1273, en ligne en latin sur http://www.newadvent.org/summa, en français sur le site Web http://docteurangelique.free.fr/index.html. Cité en page 19.

12 Pour une explication des mouvements « intérieurs », consultez le magnifique ouvrage de Richard Schwartz, *Internal Family Systems Therapy*, The Guilford Press, 1995. Cité en page 19.

13 Lisez par exemple le texte fascinant de David G. Chandler, *The Campaigns of Napoleon - The Mind and Method of History's Greatest Soldier*, Macmillan, 1966. Cité en page 19.

14 Richard Marcus, *American Roulette*, St Martin's Press, 2003, un récit haletant tiré d'une histoire vraie. Cité en page 19.

15 Un livre agréable et divertissant sur le changement de comportement est le manuel connu de R. Bandler, *Using Your Brain for a Change*, Real People Press, 1985. Consultez également Richard Bandler & John Grinder, *Frogs into princes – Neuro Linguistic Programming*, Eden Grove Editions, 1990. Cité aux pages 20 et 28.

16 Le livre suivant est un livre admirable sur les mécanismes de la croissance humaine depuis la cellule originelle jusqu'à la taille définitive : Lewis Wolpert, *The Triumph of the Embryo*, Oxford University Press, 1991. Cité en page 20.

17 Sur le thème de la grâce et de l'équilibre, lisez par exemple les nombreux livres sur la technique Alexander, tels que M. Gelb, *Body Learning – An Introduction to the Alexander Tech-*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

nique, Aurum Press, 1981, et Richard Brennan, *Introduction to the Alexander Technique*, Little Brown and Company, 1996. Entre autres, l'idée de la technique Alexander est de revenir à la situation où les groupes de muscles nécessaires à la sustentation et ceux nécessaires au mouvement sont utilisés uniquement pour leurs fonctions respectives, et non l'inverse. Toute tension musculaire inutile, telle que le durcissement du cou, est un gaspillage d'énergie dû à l'usage de muscles de la sustentation pour le mouvement et de muscles du mouvement pour la sustentation. La technique enseigne la manière de revenir à l'usage naturel des muscles.

Le déplacement des animaux fut considérablement débattu déjà au dix-septième siècle par G. Borelli, *De motu animalium*, 1680. Un exemple d'une approche plus moderne est J. J. Collins & I. Stewart, Hexapodal gaits and coupled nonlinear oscillator models, *Biological Cybernetics* **68**, pp. 287–298, 1993. Voyez aussi I. Stewart & M. Golubitsky, *Fearful Symmetry*, Blackwell, 1992. Cité aux pages 22 et 91.

18 Les résultats sur le développement des enfants mentionnés ici et dans les lignes suivantes ont été esquissés principalement à partir des recherches initiées par Jean Piaget. Pour plus de détails sur le développement de l'enfant, lisez l'intermède qui suit ce chapitre, à la page **??**. Sur http://www.piaget.org vous pouvez découvrir le site Web maintenu par l'association Jean Piaget Society. Cité aux pages 22, 33 et 35.

19 Le cerveau reptilien (manger ? s'enfuir ? ignorer ?), appelé également l'archipallium ou R-complex, contient le tronc cérébral, le cervelet, les noyaux gris centraux et le thalamus. Le cerveau paléo-mammalien (émotions), appelé aussi système limbique, contient l'amygdale, l'hypothalamus et l'hippocampe. Le cerveau humain (et primate) (raisonnement logique), dit néo-mammalien ou néocortex, est constitué de la célèbre matière grise. Pour des images du cerveau, consultez l'atlas de John Nolte, *The Human Brain : An Introduction to its Functional Anatomy*, Mosby, fourth edition, 1999. Cité en page 23.

20 Le film du coin inférieur gauche peut être reproduit sur un ordinateur après avoir tapé les lignes suivantes dans le logiciel Mathematica : Cité en page 24.

```
    « Graphics‘Animation‘
Nxpixels=72 ; Nypixels=54 ; Nframes=Nxpixels 4/3 ;
Nxwind=Round[Nxpixels/4] ; Nywind=Round[Nypixels/3] ;
front=Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
back =Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
frame=Table[front,{nf,1,Nframes}] ;
Do[ If[ x>n-Nxwind && x<n && y>Nywind && y<2Nywind,
  frame[[n,y,x]]=back[[y,x-n]] ],
     {x,1,Nxpixels}, {y,1,Nypixels}, {n,1,Nframes}] ;
film=Table[ListDensityPlot[frame[[nf]], Mesh-> False,
  Frame-> False, AspectRatio-> N[Nypixels/Nxpixels],
  DisplayFunction-> Identity],    {nf,1,Nframes}]
ShowAnimation[film]
```

Mais notre système de détection du mouvement est beaucoup plus puissant que l'exemple montré dans les coins inférieurs gauches. Le film suivant, différent, souligne ce point.

```
    « Graphics‘Animation‘
Nxpixels=72 ; Nypixels=54 ; Nframes=Nxpixels 4/3 ;
Nxwind=Round[Nxpixels/4] ; Nywind=Round[Nypixels/3] ;
front=Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
back =Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
```

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

```
frame=Table[front,{nf,1,Nframes}] ;
Do[ If[ x>n-Nxwind && x<n && y>Nywind && y<2Nywind,
  frame[[n,y,x]]=back[[y,x]] ],
      {x,1,Nxpixels}, {y,1,Nypixels}, {n,1,Nframes}] ;
film=Table[ListDensityPlot[frame[[nf]], Mesh-> False,
  Frame-> False, AspectRatio-> N[Nypixels/Nxpixels],
  DisplayFunction-> Identity],    {nf,1,Nframes}]
ShowAnimation[film]
```

Des expériences identiques, par exemple en utilisant des motifs aléatoires se modifiant au hasard, montrent que l'œil perçoit le mouvement même dans les cas où toutes les composantes de Fourier de l'image sont pratiquement nulles. Un tel effet du mouvement est qualifié de *non-Fourier*. De nombreux exemples sont présentés dans J. Zanker, Modelling human motion perception I : Classical stimuli, *Naturwissenschaften* **81**, pp. 156–163, 1994, et J. Zanker, Modelling human motion perception II : Beyond Fourier motion stimuli, *Naturwissenschaften* **81**, pp. 200–209, 1994.

21 Une introduction à l'étude de la perception : Bruce Goldstein, *Perception*, Books/Cole, 5th edition, 1998. Cité aux pages 19 et 24.

22 Toutes les citations d'Héraclite sont tirées de John Mansley Robinson, *An Introduction to Early Greek Philosophy*, Houghton Muffin 1968, chapitre 5. Cité en page 25.

23 Une introduction à l'alchimie selon Newton se trouve dans les deux ouvrages de Betty Jo Teeter Dobbs, *The Foundations of Newton's Alchemy*, Cambridge University Press, 1983, et *The Janus Face of Genius*, Cambridge University Press, 1992. Newton y apparaît comme étant une sorte de magicien hautement intellectuel, cherchant désespérémment des exemples de processus divins qui interagissent avec le monde matériel. C'est un récit profond mais tragique. Un bon aperçu en est donné par R. G. Keesing, Essay Review : Newton's Alchemy, *Contemporary Physics* **36**, pp. 117–119, 1995.

La théologie puérile de Newton, caractéristique de ceux qui sont en quête de Dieu et qui ont grandi sans avoir de père, peut être relevée dans les nombreux livres récapitulant les échanges de lettres entre Clarke, son secrétaire, et Leibniz, le rival de Newton pour la renommée. Cité en page 30.

24 Une introduction à l'histoire de la mécanique classique, qui destitue également un certain nombre de légendes qui tournent autour d'elle – telles que l'idée que Newton pouvait résoudre des équations différentielles ou celle qu'il introduisit l'expression $F = ma$ – est contée par Clifford A. Truesdell, *Essays in the History of Mechanics*, Springer, 1968. Cité aux pages 30, 130 et 156.

25 C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi & L. Vestergaard Hau, Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses, *Nature* **409**, pp. 490–493, 2001. Il existe aussi un commentaire sur cet article dans E. A. Cornell, Stopping light in its track, **409**, pp. 461–462, 2001. Toutefois, malgré la prétention, les pulsations lumineuses n'ont bien sûr *pas* été stoppées. Pouvez-vous en donner au moins deux raisons sans avoir lu cet article, et peut-être une troisième après l'avoir lu ? Défi 568 s

Le travail était un perfectionnement d'une expérience précédente dans laquelle une vitesse de groupe de la lumière de 17 m/s a été atteinte, dans un gaz ultra-froid d'atomes de sodium, à des températures de l'ordre du nanokelvin. Ceci a été rapporté par L. Vestergaard Hau, S. E. Harris, Z. Dutton & C. H. Behroozi, Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas, *Nature* **397**, pp. 594–598, 1999. Cité en page 33.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

26 Rainer Flindt, *Biologie in Zahlen – Eine Datensammlung in Tabellen mit über 10.000 Einzelwerten*, Spektrum Akademischer Verlag, 2000. Cité en page 33.

27 Deux jets cosmiques de cette vitesse ont été observés par I. F. Mirabel & L. F. Rodríguez, A superluminal source in the Galaxy, *Nature* **371**, pp. 46–48, 1994, en plus des commentaires de la p. 18. Cité en page 34.

28 Une admirable introduction aux mouvements les plus lents dans la nature, les modifications des paysages, est dans Detlev Busche, Jürgen Kempf & Ingrid Stengel, *Landschaftsformen der Erde – Bildatlas der Geomorphologie*, Primus Verlag, 2005. Cité en page 32.

29 Une introduction à la perception du temps comme conséquence des horloges dans le cerveau est fournie dans R. B. Ivry & R. Spencer, The neural representation of time, *Current Opinion in Neurobiology* **14**, pp. 225–232, 2004. Les horloges chimiques qui se trouvent dans notre corps sont décrites dans John D. Palmer, *The Living Clock*, Oxford University Press, 2002, ou dans A. Ahlgren & F. Halberg, *Cycles of Nature : An Introduction to Biological Rhythms*, National Science Teachers Association, 1990. Consultez aussi le site Web http://www.msi.umn.edu/~halberg/introd/. Cité en page 36.

30 Ceci a été montré, entre autres, par le travail d'Anna Wierzbicka cité avec plus de détails dans l'intermède qui suit ce chapitre, à la page **??**. Le best-seller passionné de l'auteur chomskien Steven Pinker, *The Language Instinct – How the Mind Creates Language*, Harper Perennial, 1994, discute également des sujets relatifs à cette question, réfutant entre autres à la page 63 l'affirmation fausse souvent réitérée que la langue *hopi* est une exception. Cité en page 37.

31 Aristote repoussait l'idée de l'écoulement du temps dans le chapitre IV de sa *Physique*. Lisez le texte complet sur le site Web http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.4.iv.html. Cité en page 38.

32 Le livre le plus instructif de tous les livres sur la « flèche du temps » est probablement Hans Dieter Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer Verlag, 4th edition, 2001. C'est toujours le meilleur livre sur le sujet. La plupart des autres textes – regardez sur le Web – manquent de clarté dans les idées.

Un compte rendu caractéristique de conférence est J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader & Wojciech H. Zurek, *Physical Origins of Time Asymmetry*, Cambridge University Press, 1994. Cité en page 39.

33 Sur le thème du mouvement absolu et relatif il existe de nombreux manuels qui traitent de certains problèmes. Par exemple John Barbour, *Absolute or Relative Motion ? Vol. 1 : A Study from the Machian Point of View of the Discovery and the Structure of Spacetime Theories*, Cambridge University Press, 1989, John Barbour, *Absolute or Relative Motion ? Vol. 2 : The Deep Structure of General Relativity*, Oxford University Press, 2005, ou John Earman, *World Enough and Spacetime : Absolute vs Relational Theories of Spacetime*, MIT Press, 1989. Cité en page 43.

34 R. Dougherty & M. Foreman, Banach-Tarski decompositions using sets with the property of Baire, *Journal of the American Mathematical Society* 7, pp. 75–124, 1994. Voir également Alan L. T. Paterson, *Amenability*, American Mathematical Society, 1998, et Robert M. French, The Banach-Tarski theorem, *The Mathematical Intelligencer* **10**, pp. 21–28, 1998. Enfin, il y a les livres de Bernard R. Gelbaum & John M. H. Olmsted, *counter-examples in Analysis*, Holden–Day, 1964, et leur *Theorems and counter-examples in Mathematics*, Springer, 1993. Cité en page 46.

35 Ce magnifique ouvrage, qui n'est pas facile à lire, est Stan Wagon, *The Banach Tarski Paradox*, Cambridge University Press, 1993. Cité aux pages 47 et 357.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

36 À propos des formes des bactéries d'eau salée, lisez la section appropriée dans le livre captivant de Bernard Dixon, *Power Unseen – How Microbes Rule the World*, W.H. Freeman, 1994. Le livre possède environ 80 sections, dans lequelles plusieurs micro-organismes sont présentés de manière vivante. Cité en page 47.

37 Les distances les plus petites sont sondées dans les accélérateurs de particules, la distance peut être déterminée d'après l'énergie du flux des particules incidentes. En 1996, la valeur de 10^{-19} m (pour la limite supérieure à la taille des quarks) fut frôlée dans l'expérience décrite dans F. Abe & al., Measurement of dijet angular distributions by the collider detector at Fermilab, *Physical Review Letters* 77, pp. 5336–5341, 1996. Cité en page 51.

38 Alexander K. Dewdney, *The Planiverse – Computer Contact with a Two-dimensional World*, Poseidon Books/Simon & Schuster, 1984. Plusieurs autres auteurs de fictions ont auparavant exploré la possibilité d'un univers bidimensionnel, répondant toujours, de manière incorrecte, par l'affirmative. Cité en page 56.

39 Il y a toute une histoire masquée derrière les variations de g. Elle peut être trouvée dans Chuji Tsuboi, *Gravity*, Allen & Unwin, 1979, ou dans Wolfgang Torge, *Gravimetry*, de Gruyter, 1989, ou dans Milan Burša & Karel Pěč, *The Gravity Field and the Dynamics of the Earth*, Springer, 1993. La variation de la hauteur du sol d'environ 0,3 m causée par la Lune est un des effets intéressants découverts par ces recherches. Cité aux pages 58 et 136.

40 Andrea Frova, *La fisica sotto il naso – 44 pezzi facili*, Biblioteca Universale Rizzoli, Milano, 2001. Cité en page 58.

41 L'étude des excréments projetés (c'est-à-dire, la merde) et de ses mécanismes forme une partie de la biologie moderne. Les raisons pour lesquelles les chenilles en font ainsi ont été déterminées par M. Weiss, Good housekeeping : why do shelter-dwelling caterpillars fling their frass ?, *Ecology Letters* **6**, pp. 361–370, 2003, qui donne également le record actuel de 1,5 m pour des boulettes de 24 mg de *Epargyreus clarus*. La photographie des fèces volantes est tirée de S. Caveney, H. McLean & D. Surry, Faecal firing in a skipper caterpillar is pressure-driven, *The Journal of Experimental Biology* **201**, pp. 121–133, 1998. Cité en page 60.

42 Ceci fut discuté dans le *Frankfurter Allgemeine Zeitung* du 2 août 1997, au même moment que le Championnat du monde d'athlétisme. Ces valeurs concernent la partie la plus rapide de la course d'un sprinteur du 100 m, les valeurs exactes citées furent qualifiées de records mondiaux de la course de vitesse en 1997, et sont données comme valant 12,048 m/s = 43,372 km/h par Ben Johnson pour les hommes, et 10,99 m/s = 39,56 km/h pour les femmes. Cité en page 60.

43 La littérature et les données sur le saut en longueur peuvent être consultées dans trois articles tous intitulés Is a good long jumper a good high jumper ?, dans *American Journal of Physics* **69**, pp. 104–105, 2001. En particulier, les sauteurs en longueur de rang mondial courent à $9{,}35 \pm 0{,}15$ m/s, avec une vitesse verticale de décollage de $3{,}35 \pm 0{,}15$ m/s, fournissant des angles de décollage d'environ 20° (seulement). Une nouvelle technique pour atteindre des angles de décollage plus importants permettrait d'accroître considérablement le record mondial de saut en longueur. Cité en page 60.

44 Les hypothèses de Zénon peuvent être consultées dans Aristote, *Physique*, VI, 9. On peut en trouver la traduction dans la plupart des langues. Le site Web http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.6.vi.html en fournit une version en ligne en anglais. Cité aux pages 62 et 328.

45 L'étymologie peut se révéler être un domaine fascinant, par exemple lorsque des chercheurs découvrirent l'origine du mot allemand « Weib » (« femme », relié à la traduction anglaise de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

« épouse », « wife »). Il a été découvert, via quelques textes en Tokharien – une langue indo-européenne éteinte issue d'une région située à l'intérieur de la Chine moderne –, qu'il signifiait à l'origine « honte ». Il était utilisé pour désigner la partie génitale de la femme dans une expression qui signifiait « zone de la honte ». Avec le temps, cette expression fut utilisée pour dire « femme » en général, tout en étant réduite au second terme uniquement. Ce lien de parenté fut découvert par le linguiste allemand Klaus T. Schmidt, il explique notamment pourquoi le mot n'est pas féminin mais neutre, c'est-à-dire pourquoi il utilise l'article allemand « das » (le) au lieu de « die » (la). (Julia Simon, communication privée.)

L'étymologie peut également être un divertissement simple et accessible, par exemple lorsque nous découvrons dans le dictionnaire *Oxford English Dictionary* que « testimony » (« témoignage ») et « testicle » (« testicule ») ont la même origine, c'est-à-dire qu'ils dérivent du même mot latin « testis » qui était utilisé pour les deux à la fois. Cité aux pages 65 et 73.

46 Une synthèse des derniers développements en est donnée par J. T. Armstrong, D. J. Hunter, K. J. Johnston & D. Mozurkewich, Stellar optical interferometry in the 1990s, *Physics Today* pp. 42–49, Mai 1995. Plus de 100 diamètres stellaires étaient déjà recensés en 1995. Plusieurs instruments de haute précision spécialement dédiés ont été prévus. Cité en page 66.

47 Un excellent manuel de biologie sur la croissance : Arthur F. Hopper & Nathan H. Hart, *Foundations of Animal Development*, Oxford University Press, 2006. Cité en page 66.

48 Ceci est discuté par exemple dans C. L. Stong, The amateur scientist – how to supply electric power to something which is turning, *Scientific American* pp. 120–125, décembre 1975. Il décrit également comment réaliser une image immobile d'un objet en rotation simplement en utilisant quelques prismes, que l'on appelle des *prismes de Dove*. D'autres exemples d'objets attachés à un corps en rotation sont donnés par E. Rieflin, Some mechanisms related to Dirac's strings, *American Journal of Physics* **47**, pp. 379–381, 1979. Cité en page 67.

49 James A. Young, Tumbleweed, *Scientific American* **264**, pp. 82–87, mars 1991. Le buisson épineux est en réalité extrêmement rare, excepté dans les westerns de Hollywood, dans lesquels tous les metteurs en scène se sentent obligés de leur donner leur aspect si particulier. Cité en page 67.

50 Les premières expériences qui ont mis en évidence la rotation des flagelles étaient de M. Silverman & M. I. Simon, Flagellar rotation and the mechanism of bacterial motility, *Nature* **249**, pp. 73–74, 1974. Pour voir quelques belles images des molécules impliquées, consultez K. Namba, A biological molecular machine : bacterial flagellar motor and filament, *Wear* **168**, pp. 189–193, 1993, ou le site Web http://www.nanonet.go.jp/english/mailmag/2004/011a.html. Le record actuel de vitesse de rotation, 1 700 rotations par seconde, est signalé par Y. Magariyama, S. Sugiyama, K. Muramoto, Y. Maekawa, I. Kawagishi, Y. Imae & S. Kudo, Very fast flagellar rotation, *Nature* **371**, p. 752, 1994.

On peut en apprendre davantage sur les bactéries dans David Dusenbery, *Life at a Small Scale*, Scientific American Library, 1996. Cité en page 69.

51 Sur les ombres, lisez le texte populaire agréable de Roberto Casati, *Alla scoperta dell'ombra – Da Platone a Galileo la storia di un enigma che ha affascinato le grandi menti dell'umanità*, Oscar Mondadori, 2000, et ses sites Web situés sur http://www.shadowmill.com et http://roberto.casati.free.fr/casati/roberto.htm. Cité en page 70.

52 Il y a également le magnifique ouvrage de Penelope Farrant, *Colour in Nature*, Blandford, 1997. Cité en page 70.

53 Les « lois » de la physique des dessins animés peuvent aisément être débusquées en utilisant

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

n'importe quel moteur de recherche sur Internet. Cité en page 70.

54 Pour les curieux, une vue d'ensemble des illusions utilisées au cinéma et à la télévision, qui conduisent à quelques-unes des étranges propriétés des images mentionnées ci-dessus, est donnée dans Bernard Wilkie, *The Technique of Special Effects in Television*, Focal Press, 1993, et dans ses autres livres, ou dans le magazine *Cinefex*. Cité en page 71.

55 Aetius, Opinions, I, XXIII, 3. Voir Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 426, 1991. Cité en page 71.

56 Giuseppe Fumagalli, *Chi l'ha detto ?*, Hoepli, 1983. Cité aux pages 72 et 162.

57 Pour le rôle et la chimie de l'adénosine triphosphate (ATP) dans les cellules et dans les êtres vivants, lisez n'importe quel livre de biochimie, ou cherchez sur le Web. La révélation des mécanismes relatifs à l'ATP fut récompensée par des prix Nobel en chimie en 1978 et en 1997. Cité en page 80.

58 Une photographie de cette horloge unique au monde peut être trouvée dans l'article de A. Garrett, Perpetual motion – a delicious delirium, *Physics World* pp. 23–26, décembre 1990. Cité en page 81.

59 Une étude de Shell a estimé la consommation mondiale totale d'énergie en l'an 2000 à 500 EJ. Le département américain de l'Énergie l'a estimée autour de 416 EJ. Nous avons pris ici la valeur la plus basse. Une discussion et une analyse de l'usage de l'électricité (14 EJ) et d'autres formes d'énergie, avec des variations par pays, peuvent être consultées dans S. Benka, The energy challenge, *Physics Today* **55**, pp. 38–39, avril 2002, et dans E. J. Monitz & M. A. Kenderdine, Meeting energy challenges : technology and policy, *Physics Today* **55**, pp. 40–46, avril 2002. Cité en page 83.

60 Pour une synthèse, lisez l'article de J. F. Mulligan & H. G. Hertz, An unpublished lecture by Heinrich Hertz : 'On the energy balance of the Earth', *American Journal of Physics* **65**, pp. 36–45, 1997. Cité en page 85.

61 Pour une magnifique photographie de cette prouesse féline, regardez la couverture du journal et l'article de J. Darius, A tale of a falling cat, *Nature* **308**, p. 109, 1984. Cité en page 90.

62 Natthi L. Sharma, A new observation about rolling motion, *European Journal of Physics* **17**, pp. 353–356, 1996. Cité en page 91.

63 C. Singh, When physical intuition fails, *American Journal of Physics* **70**, pp. 1103–1109, 2002. Cité en page 91.

64 Serge Gracovetsky, *The Spinal Engine*, Springer Verlag, 1990. Il est aussi maintenant établi que la démarche humaine est chaotique. Cela est expliqué par M. Perc, The dynamics of human gait, *European Journal of Physics* **26**, pp. 525–534, 2005. Cité en page 92.

65 Thomas Heath, *Aristarchus of Samos – the Ancient Copernicus*, Dover, 1981, réimpression de l'édition originale de 1913. Le traité d'Aristarque est disponible en grec et en anglais. Aristarque fut le premier instigateur du système héliocentrique. Il avait mesuré la durée du jour (en fait, en déterminant le nombre de jours par an) à la précision ahurissante de moins d'une seconde. Cet excellent ouvrage fournit également un tour d'horizon de l'astronomie grecque avant Aristarque, décrite en détail pour chaque penseur grec. Le texte d'Aristarque est aussi reproduit dans Aristarchos, On the sizes and the distances of the Sun and the Moon, v. 280 av. J.-C. dans Michael J. Crowe, *Theories of the World From Antiquity to the Copernican Revolution*, Dover, 1990, particulièrement aux pp. 27–29. Cité en page 94.

66 L'influence de la force de Coriolis sur les icebergs fut étudiée de manière plus approfondie par le physicien suédois qui devint océanographe par la suite Walfrid Ekman (1874–1954). Ce sujet fut suggéré par le grand explorateur Fridtjof Nansen, qui fit également les premières

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

observations. En son honneur, nous parlons de la couche d'Ekman, du transport d'Ekman et des spirales d'Ekman. N'importe quel texte sur l'océanographie ou sur la géographie physique fournit plus d'informations à ce propos. Cité en page 96.

67 Une synthèse des conséquences de l'accélération de Coriolis $\mathbf{a} = -2\omega \times \mathbf{v}$ dans le référentiel en rotation est donnée par Edward A. Desloge, *Classical Mechanics*, Volume 1, John Wiley & Sons, 1982. Même le courant dénommé *Gulf Stream*, ce courant d'eau chaude qui circule de la mer des Caraïbes vers la mer du Nord, est influencé par celui-ci. Cité en page 96.

68 La publication originale est de A. H. Shapiro, Bath-tub vortex, *Nature* **196**, pp. 1080–1081, 1962. Il produisit aussi deux films de l'expérience. L'expérience a été reproduite de nombreuses fois dans les hémisphères Nord et Sud, où l'eau s'écoule dans le sens des aiguilles d'une montre. Le premier test dans l'hémisphère Sud a été fait par L.M. Trefethen & al., The bath-tub vortex in the southern hemisphere, *Nature* **201**, pp. 1084–1085, 1965. Une bibliographie complète se trouve dans les notes aux éditeurs de *American Journal of Physics* **62**, p. 1063, 1994. Cité en page 96.

69 Les astuces sont expliquées par Richard Crane, Short Foucault pendulum : a way to eliminate the precession due to ellipticity, *American Journal of Physics* **49**, pp. 1004–1006, 1981, et plus particulièrement dans Richard Crane, Foucault pendulum wall clock, *American Journal of Physics* **63**, pp. 33–39, 1993. Le pendule de Foucault a été également le sujet de la thèse de Heike Kamerling Onnes, Nieuwe bewijzen der aswenteling der aarde, Universiteit Groningen, 1879. Cité en page 97.

70 La référence est J. G. Hagen, La rotation de la terre : ses preuves mécaniques anciennes et nouvelles, *Sp. Astr. Vaticana Second. App.* Rome, 1910. Son autre expérience est publiée dans J. G. Hagen, How Atwood's machine shows the rotation of the Earth even quantitatively, International Congress of Mathematics, août 1912. Cité en page 98.

71 R. Anderson, H. R. Bilger & G. E. Stedman, The Sagnac-effect : a century of Earth-rotated interferometers, *American Journal of Physics* **62**, pp. 975–985, 1994.

Lisez également l'article exhaustif et limpide de G. E. Stedman, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* **60**, pp. 615–688, 1997. Cité en page 99.

72 À propos de la durée du jour, consultez le site Web http://maia.usno.navy.mil ou les livres de K. Lambeck, *The Earth's Variable Rotation : Geophysical Causes and Consequences*, Cambridge University Press, 1980, et de W. H. Munk & G. J. F. MacDonald, *The Rotation of the Earth*, Cambridge University Press, 1960. Concernant une installation récente de laser en anneau, voyez http://www.wttzell.ifag.de. Cité aux pages 99 et 138.

73 Un exemple de données expérimentales se trouve dans C. P. Sonett, E. P. Kvale, A. Zakharian, M. A. Chan & T. M. Demko, Late proterozoic and paleozoic tides, retreat of the moon, and rotation of the Earth, *Science* **273**, pp. 100–104, 5 juillet 1996. Les auteurs concluent à partir des analyses de sédiments marins que les jours duraient 18 à 19 heures seulement durant le protérozoïque, c'est-à-dire il y a 900 millions d'années. Ils supposent que l'année est longue de 31 millions de secondes depuis cette période jusqu'à aujourd'hui. Une autre détermination fut donnée par G. E. Williams, Precambrian tidal and glacial clastic deposits : implications for precambrian Earth–Moon dynamics and palaeoclimate, *Sedimentary Geology* **120**, pp. 55–74, 1998. En utilisant une configuration géologique appelée *rythmites tidales*, il déduisit qu'il y a environ 600 millions d'années il y avait 13 mois par an et que la journée comportait 22 heures. Cité en page 99.

74 Le récit de cette association entre l'histoire et l'astronomie est contée dans Richard Stephenson, *Historical Eclispes and Earth's Rotation*, Cambridge University

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Press, 1996. Cité en page 100.

75 Sur cette rotation et l'histoire du Système solaire, lisez S. Brush, Theories of the origin of the solar system 1956–1985, *Reviews of Modern Physics* **62**, pp. 43–112, 1990. Cité en page 100.

76 Le site Web http://maia.usno.navy.mil montre le mouvement de l'axe de la Terre durant les dix dernières années. Le Service international des latitudes fondé par Küstner fait maintenant partie du Service international de la rotation terrestre, plus d'informations peuvent être trouvées sur le site Web http://www.iers.org. La dernière avancée est que les deux tiers de la composante circulaire du mouvement polaire, qui est dénomée « oscillation de Chandler » aux USA d'après la personne qui s'attribua la découverte de Küstner, sont dus aux fluctuations de la pression des océans au fond de ceux-ci et un tiers est dû aux variations de pression dans l'atmosphère terrestre. L'explication en est fournie par R. S. Gross, The excitation of the Chandler wobble, *Geophysical Physics Letters* **27**, pp. 2329–2332, 2000. Cité en page 101.

77 Pour avoir plus d'informations sur Alfred Wegener, lisez le texte (accessible) de Klaus Rohrbach, *Alfred Wegener – Erforscher der wandernden Kontinente*, Verlag Freies Geistesleben, 1993. À propos de la tectonique des plaques, allez sur le site Web http://www.scotese.com. Pour les séismes, voir les sites http://www.geo.ed.ac.uk/quakexe/quakes et http://www.iris.edu/seismon. Consultez les sites http://vulcan.wr.usgs.gov et http://www.dartmouth.edu/~volcano/ pour avoir plus d'informations sur les volcans. Cité en page 102.

78 J. D. Hays, J. Imbrie & N. J. Shackleton, Variations in the Earth's orbit : pacemaker of the ice ages, *Science* **194**, pp. 1121–1132, 1976. Ils découvrirent ce résultat en s'enfonçant littéralement dans la vase qui recouvre le plancher des océans à certains endroits. Remarquez que le Web regorge d'informations sur les ères glaciaires. Tapez simplement « Milankovitch » dans un moteur de recherche. Cité en page 104.

79 Roberta Humphreys & Jeffrey Larsen, The sun's distance above the galactic plane, *Astronomical Journal* **110**, pp. 2183–2188, novembre 1995. Cité en page 105.

80 C. L. Bennet, M. S. Turner & M. White, The cosmic rosetta stone, *Physics Today* **50**, pp. 32–38, novembre 1997. Cité en page 105.

81 Un bon récit des prédictions sur le jeu de roulette des années 1970 est relaté par Thomas A. Bass, *The Eudaemonic Pie* également publié sous le titre *The Newtonian Casino*, Backinprint, 2000. Un tour d'horizon jusqu'en 1998 en est donné dans l'article d' Edward O. Thorp, The invention of the first wearable computer, *Proceedings of the Second International Symposium on Wearable Computers* (ISWC 1998), 19-20 octobre 1998, Pittsburgh, Pennsylvania, USA (IEEE Computer Society), pp. 4–8, 1998, téléchargeable sur http://csdl.computer.org/comp/proceedings/iswc/1998/9074/00/9074toc.htm. Cité en page 108.

82 Les articles originaux sont A. H. Compton, A laboratory method of demonstrating the Earth's rotation, *Science* **37**, pp. 803–806, 1913, A. H. Compton, Watching the Earth revolve, *Scientific American Supplement* no. 2047, pp. 196–197, 1915, et A. H. Compton, A determination of latitude, azimuth and the length of the day independent of astronomical observations, *Physical Review* (second series) **5**, pp. 109–117, 1915. Cité en page 98.

83 Ceci, ainsi que de nombreuses autres surprises en physique, est décrit dans la magnifique retranscription de la conférence de Josef Zweck, *Physik im Alltag*, notes de ses cours qui se tinrent en 1999-2000 à l'université de Regensburg (Ratisbonne). Cité aux pages 109 et 113.

84 L'équilibre des navires, si primordial dans les car-ferries, est une partie captivante de la construction navale, une introduction en était déjà faite par Leonhard Euler, Scientia navalis, 1749. Cité en page 110.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

85 K. R. Weninger, B. P. Barber & S. J. Putterman, Pulsed Mie scattering measurements of the collapse of a sonoluminescing bubble, *Physical Review Letters* **78**, pp. 1799–1802, 1997. Cité en page 110.

86 Sur le site http://www.sff.net/people/geoffrey.landis/vacuum.html, vous pourrez lire une description de ce qui se passe. Regardez aussi les sites http://www.sff.net/people/geoffrey.landis/ebullism.html et http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/ask_astro/answers/970603.html. Ils fournissent tous des détails sur les effets du vide sur les êtres humains. Cité en page 111.

87 R. McN. Alexander, Leg design and jumping technique for humans, other vertebrates and insects, *Philosophical Transactions of the Royal Society in London B* **347**, pp. 235–249, 1995. Cité en page 117.

88 J. W. Glasheen & T. A. McMahon, A hydrodynamic model of locomotion in the basilisk lizard, *Nature* **380**, pp. 340–342, Pour des photographies, consultez aussi *New Scientist*, p. 18, 30 mars 1996, ou *Scientific American*, pp. 48–49, septembre 1997, ou encore le site Web de l'auteur sur http://rjf2.biol.berkeley.edu/Full_Lab/FL_Personnel/J_Glasheen/J_Glasheen.html.

Divers limicoles* ont également l'aptitude à courir sur l'eau, en utilisant le même procédé. Cité en page 118.

89 A. Fernandez–Nieves & de las Nieves, About the propulsion system of a kayak and of *Basiliscus basiliscus*, *European Journal of Physics* **19**, pp. 425–429, 1998. Cité en page 118.

90 M. Wittlinger, R. Wehner & H. Wolf, The ant odometer : stepping on stilts and stumps, *Science* **312**, pp. 1965–1967, 2006. Cité en page 119.

91 Le débat sur cette histoire ténébreuse est tiré du livre de Robert M. Pryce, *Cook and Peary*, Stackpole Books, 1997. Voir aussi Wally Herbert, *The Noose of Laurels*, Doubleday 1989. Le récit déplorable de Robert Peary est également relaté dans le numéro centenaire de *National Geographic*, septembre 1988. Comme la National Geographic Society avait financé l'effort de Peary et l'avait soutenu jusqu'à ce que le Congrès américain l'ait déclaré premier homme à avoir atteint le pôle, la rétractation (partielle) fut remarquée. (Le magazine changea d'avis une nouvelle fois un peu plus tard, pour vendre plus de numéros.) Par ailleurs, les photographies de Cook, qui prétendit avoir atteint le pôle Nord avant même Peary, ont le même problème de longueur d'ombre. L'histoire des deux hommes est truffée de duperies concernant leurs « exploits ». Par conséquent, le premier homme à avoir atteint le pôle Nord fut probablement Roald Amundsen, qui y arriva quelques années plus tard, et qui fut également le premier homme à rallier le pôle Sud. Cité en page 120.

92 L'histoire se trouve dans M. Nauenberg, Hooke, orbital motion, and Newton's Principia, *American Journal of Physics* **62**, 1994, pp. 331–350. Cité en page 121.

93 Plus de détails sont donnés par D. Rawlins, dans Doubling your sunsets or how anyone can measure the Earth's size with wristwatch and meter stick, *American Journal of Physics* **47**, 1979, pp. 126–128. Une autre évaluation simple du rayon de la Terre, en utilisant uniquement un sextant, est fournie par R. O'Keefe & B. Ghavimi–Alagha, dans The World Trade Centre and the distance to the world's centre, *American Journal of Physics* **60**, pp. 183–185, 1992. Cité en page 122.

94 Plusieurs informations sur les mesures de distances astronomiques peuvent être compulsées dans le merveilleux petit ouvrage de van Helden, *Measuring the Universe*, University of Chicago Press, 1985, et dans Nigel Henbest & Heather Cooper, *The Guide to the Galaxy*, Cambridge University Press, 1994. Cité en page 122.

* Oiseaux des marécages ou des rivages marins [N.D.T.].

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

95 Une foule de détails peut être relevée dans M. Jammer, *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, réimprimé par Dover, 1997, et dans *Concepts of Force, a Study in the Foundations of Mechanics*, Harvard University Press, 1957. Ces manuels éclectiques qui traitent le sujet de manière approfondie fournissent un grand nombre de détails et exposent divers points de vue philosophiques, mais manquent de formulations et de conclusions claires sur la description exacte de la nature, il n'apportent donc qu'une aide restreinte sur les problèmes fondamentaux.

Jean Buridan (v. 1295 à v. 1366) critiqua la distinction entre les mouvements sublunaires et supralunaires dans son œuvre *De Caelo*, un de ses nombreux travaux. Cité en page 122.

96 D. Topper & D. E. Vincent, An analysis of Newton's projectile diagram, *European Journal of Physics* **20**, pp. 59–66, 1999. Cité en page 122.

97 L'histoire insensée du mètre est relatée dans le roman historique de Ken Alder, *The Measure of All Things : The Seven-Year Odyssey and Hidden Error that Transformed the World*, The Free Press, 2003. Cité en page 125.

98 H. Edelmann, R. Napiwotzki, U. Heber, N. Christlieb & D. Reimers, HE 0437-5439 : an unbound hyper-velocity B-type star, *The Astrophysical Journal* **634**, pp. L181–L184, 2005. Cité en page 145.

99 Ceci est exposé par exemple par D.K. Firpić & I.V. Aniçin, The planets, after all, may run only in perfect circles – but in the velocity space !, *European Journal of Physics* **14**, pp. 255–258, 1993. Cité aux pages 145 et 378.

100 Concernant la mesure du nombre de dimensions spatiales via la gravité – et l'échec de la découverte d'un indice pour un nombre différent de trois –, lisez la revue de E. G. Adelberger, B. R. Heckel & A. E. Nelson, Tests of the gravitational inverse-square law, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **53**, pp. 77–121, 2003, aussi sur http://www.arxiv.org/abs/hep-ph/0307284, ou la revue de J. A. Hewett & M. Spiropulu, Particle physics probes of extra spacetime dimensions, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **52**, pp. 397–424, 2002, http://www.arxiv.org/abs/hep-ph/0205106. Cité en page 127.

101 Il existe de nombreux livres expliquant l'origine de la forme précise de la Terre, tel le livre de poche S. Anders, *Weil die Erde rotiert*, Verlag Harri Deutsch, 1985. Cité en page 128.

102 La forme de la Terre est décrite avec plus de précision à l'aide du Système géodésique mondial. Pour une présentation plus étendue, consultez le site http://www.eurocontrol.be/projects/eatchip/wgs84/start.html. Allez aussi sur le site du *Service international de la rotation terrestre* sur http://hpiers.obspm.fr. Cité en page 128.

103 W. K. Hartman, R. J. Phillips & G. J. Taylor, editors, *Origin of the Moon*, Lunar and Planetary Institute, 1986. Cité en page 132.

104 Si vous désirez vous informer sur le mouvement de la Lune dans tous ses détails fascinants, jetez un œil sur Martin C. Gutzwiller, Moon–Earth–Sun : the oldest three body problem, *Reviews of Modern Physics* **70**, pp. 589–639, 1998. Cité en page 132.

105 Dietrich Neumann, Physiologische Uhren von Insekten – Zur Ökophysiologie lunarperiodisch kontrollierter Fortpflanzungszeiten, *Naturwissenschaften* **82**, pp. 310–320, 1995. Cité en page 132.

106 L'origine de la durée du cycle menstruel n'est pas encore déterminée avec exactitude, toutefois, nous avons des explications sur la façon dont elle se synchronise avec d'autres cycles. Pour un exposé général, lisez Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum & Jürgen Kurths, *Synchronization : A Universal Concept in Nonlinear Science*, Cambridge University Press, 2002. Cité en page 132.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

107 J. Laskkar, F. Joutel & P. Robutel, Stability of the Earth's obliquity by the moon, *Nature* **361**, pp. 615–617, 1993. Cependant, ce sujet n'est pas entièrement compris, et d'autres opinions existent. Cité en page 132.

108 Neil F. Comins, *What if the Moon Did not Exist ? – Voyages to Earths that Might Have Been*, Harper Collins, 1993. Cité en page 132.

109 Lisez par exemple l'explication de J. J. Lissauer, It is not easy to make the moon, *Nature* **389**, pp. 327–328, 1997. Cité en page 132.

110 Paul A. Wiegert, Kimmo A. Innanen & Seppo Mikkola, An asteroidal companion to the Earth, *Nature* **387**, pp. 685–686, 12 juin 1997, en même temps que le commentaire aux pp. 651–652. Des détails sur l'orbite et sur le fait que les points de Lagrange ne forment pas toujours des triangles équilatéraux peuvent être comsultés dans F. Namouni, A. A. Christou & C. D. Murray, Coorbital dynamics at large eccentricity and inclination, *Physical Review Letters* **83**, pp. 2506–2509, 1999. Cité en page 135.

111 Simon Newcomb, *Astronomical Papers of the American Ephemeris* **1**, p. 472, 1882. Cité en page 136.

112 Une admirable introduction en est donnée dans le classique G. Falk & W. Ruppel, *Mechanik, Relativität, Gravitation – ein Lehrbuch*, Springer Verlag, Dritte Auflage, 1983. Cité en page 136.

113 J. Soldner, *Berliner Astronomisches Jahrbuch auf das Jahr 1804*, 1801, p. 161. Cité en page 140.

114 L'équivalence fut testée avec précision d'abord par Roland von E®tv®s, *Annalen der Physik & Chemie* **59**, p. 354, 1896, et par von E®tv®s, V. Pekàr & E. Fekete, Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität, *Annalen der Physik 4, Leipzig* **68**, pp. 11–66, 1922. Il trouva un accord de 5 parties pour 10^9. D'autres expériences furent réalisées par P. G. Roll, R. Krotkow & R. H. Dicke, The equivalence of inertial and passive gravitational mass, *Annals of Physics (NY)* **26**, pp. 442–517, 1964, un des articles de recherche les plus intéressants et les plus divertissants en physique expérimentale, et par V. B. Braginsky & V. I. Panov, *Soviet Physics – JETP* **34**, pp. 463–466, 1971. Des résultats récents, avec des erreurs de moins d'une partie pour 10^{12}, sont donnés par Y. Su & al., New tests of the universality of free fall, *Physical Review* **D50**, pp. 3614–3636, 1994. Diverses expériences ont été proposées pour tester l'équivalence dans l'espace à moins d'une partie pour 10^{16}. Cité en page 141.

115 Voir L. Hodges, Gravitational field strength inside the Earth, *American Journal of Physics* **59**, pp. 954–956, 1991. Cité en page 145.

116 P. Mohazzabi & M. C. James, Plumb line and the shape of the Earth, *American Journal of Physics* **68**, pp. 1038–1041, 2000. Cité en page 146.

117 De Neil de Gasse Tyson, *The Universe Down to Earth*, Columbia University Press, 1994. Cité en page 147.

118 C'est un petit exemple tiré du magnifique livre de Mark P. Silverman, *And Yet It Moves : Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press, 1993. C'est un véritable coffre au trésor pour quiconque est intéressé par les rouages de la physique. Cité en page 148.

119 G. D. Quinlan, Planet X : a myth exposed, *Nature* **363**, pp. 18–19, 1993. Cité en page 148.

120 Voir http://en.wikipedia.org/wiki/90377_Sedna. Cité en page 148.

121 Voir Robert Matthews, Not a snowball's chance..., *New Scientist* 12 juillet 1997, pp. 24–27. L'affirmation originale est due à Louis A. Frank, J. B. Sigwarth &

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

J. D. Craven, On the influx of small comets into the Earth's upper atmosphere, parts I and II, *Geophysical Research Letters* **13**, pp. 303–306, pp. 307–310, 1986. Les dernières observations ont discrédité cette thèse. Cité en page 149.

122 La formulation par rayon est merveilleusement expliquée dans J. Evans, The ray form of Newton's law of motion, *American Journal of Physics* **61**, pp. 347–350, 1993. Cité en page 150.

123 G. -L. Lesage, Lucrèce Newtonien, *Nouveaux Mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres* pp. 404–431, 1747, ou http://www3.bbaw.de/bibliothek/digital/struktur/03-nouv/1782/jpg-0600/00000495.htm. Cité en page 150.

124 J. Laskar, A numerical experiment on the chaotic behaviour of the solar system, *Nature* **338**, pp. 237–238, 1989, et J. Laskar, The chaotic motion of the solar system – A numerical estimate of the size of the chaotic zones, *Icarus* **88**, pp. 266–291, 1990. Le travail de Laskar fut développé plus tard par Jack Wisdom, en utilisant des ordinateurs spécialement conçus et en considérant uniquement les planètes, sans prendre en compte les corps plus petits. Pour plus de détails, consultez G. J. Sussman & J. Wisdom, Chaotic Evolution of the Solar System, *Science* **257**, pp. 56–62, 1992. Aujourd'hui, de tels calculs numériques peuvent être réalisés sur votre PC domestique à l'aide d'un programme source disponible gratuitement sur Internet. Cité en page 151.

125 B. Dubrulle & F. Graner, Titius-Bode laws in the solar system. 1 : Scale invariance explains everything, *Astronomy and Astrophysics* **282**, pp. 262–268, 1994, et Titius-Bode laws in the solar system. 2 : Build your own law from disk models, *Astronomy and Astrophysics* **282**, pp. 269–276, 1994. Cité en page 152.

126 M. Lecar, Bode's Law, *Nature* **242**, pp. 318–319, 1973, et M. Henon, A comment on "The resonant structure of the solar system" by A.M. Molchanov, *Icarus* **11**, pp. 93–94, 1969. Cité en page 152.

127 Cassius Dio, *Historia Romana*, v. 220, livre 37, 18. Pour une traduction anglaise, voir le site http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Cassius_Dio/37*.html. Cité en page 153.

128 M. Bevis, D. Alsdorf, E. Kendrick, L. P. Fortes, B. Forsberg, R. Malley & J. Becker, Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response, *Geophysical Research Letters* **32**, p. L16308, 2005. Cité en page 154.

129 D. Hestenes, M. Wells & G. Swackhamer, Force concept inventory, *Physics Teacher* **30**, pp. 141–158, 1982. Les auteurs ont développé des tests pour vérifier la compréhension du concept de force physique chez les étudiants ; ce travail a attiré beaucoup d'attention dans le champ de l'enseignement de la physique. Cité en page 157.

130 Pour une vue d'ensemble du frottement, de la physique aux sciences économiques, à l'architecture et à la théorie de l'organisation, lisez N. Åkerman, editor, *The Necessity of Friction – Nineteen Essays on a Vital Force*, Springer Verlag, 1993. Cité en page 160.

131 Voir M. Hirano, K. Shinjo, R. Kanecko & Y. Murata, Observation of superlubricity by scanning tunneling microscopy, *Physical Review Letters* **78**, pp. 1448–1451, 1997. Voir également la discussion de leurs résultats donnée par Serge Fayeulle, Superlubricity : when friction stops, *Physics World* pp. 29–30, mai 1997. Cité en page 160.

132 C. Donald Ahrens, *Meteorology Today : An Introduction to the Weather, Climate, and the Environment*, West Publishing Company, 1991. Cité en page 161.

133 Ce thème est abordé avec clarté par J. R. Mureika, What really are the best 100 m performances ?, *Athletics : Canada's National Track and Field Running Magazine*, juillet 1997.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'article peut également être trouvé sur http://www.arxiv.org/abs/physics/9705004, avec d'autres articles du même auteur sur des sujets similaires. Cité en page 161.

134 F. P. Bowden & D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press, Part I, édition corrigée, 1954, et part II, 1964. Cité en page 161.

135 Un livre saisissant sur la violence humaine de James Gilligan, *Violence – Our Deadly Epidemic and its Causes*, Grosset/Putnam, 1992. Cité en page 162.

136 Les principaux tests sur le hasard dans les séries numériques – et parmi eux le test du gorille – peuvent être trouvés dans l'article de référence de G. Marsaglia & W. W. Tsang, Some difficult-to-pass tests of randomness, *Journal of Statistical Software* **7**, p. 8, 2002. Il peut aussi être téléchargé depuis l'adresse http://www.jstatsoft.org/v07/i03/tuftests.pdf. Cité en page 165.

137 Pour un aspect de ce problème, consultez par exemple le livre fascinant de Bert Hellinger, *Zweierlei Glück*, Carl Auer Systeme Verlag, 1997. L'auteur explique comment vivre avec sérénité et avec la responsabilité la plus grande possible concernant nos agissements, en réduisant notre implication dans le destin des autres. Il décrit une technique simple et performante pour atteindre ce but.

Un point de vue complètement différent est donné par le lauréat du prix Nobel de la paix Aung San Suu Kyi, *Freedom from Fear*, Penguin, 1991. Cité en page 167.

138 Henrik Walter, *Neurophilosophie der Willensfreiheit*, Mentis Verlag, Paderborn 1999. Également disponible en traduction anglaise. Cité en page 167.

139 Giuseppe Fumagalli, *Chi l'ha detto ?*, Hoepli, 1983. Cité en page 168.

140 La magnifique histoire de la charrette qui indique toujours le sud est contée dans l'Annexe B de James Foster & J. D. Nightingale, *A Short Course in General Relativity*, Springer Verlag, 2nd edition, 1998. De telles charrettes ont existé en Chine, comme le grand sinologue Joseph Needham l'a indiqué, mais on ignore comment elles étaient construites. La charrette décrite par Foster et Nightingale est celle reconstruite en 1947 par George Lancaster, un ingénieur anglais. Cité en page 170.

141 Voyez par exemple Z. Ghahramani, Building blocks of movement, *Nature* **407**, pp. 682–683, 2000. Les chercheurs qui étudient la commande des robots sont également intéressés par ces sujets. Cité en page 170.

142 G. Gutierrez, C. Fehr, A. Calzadilla & D. Figueroa, Fluid flow up the wall of a spinning egg, *American Journal of Physics* **66**, pp. 442–445, 1998. Cité en page 171.

143 Un compte rendu historique en est donné dans Wolfgang Yourgray & Stanley Mandelstam, *Variational Principles in Dynamics and Quantum Theory*, Dover, 1968. Cité aux pages 173 et 181.

144 Max Päsler, *Prinzipe der Mechanik*, Walter de Gruyter & Co., 1968. Cité en page 179.

145 Les relations entre les éventuels lagrangiens sont analysées dans Herbert Goldstein, *Classical Mechanics*, 2nd edition, Addison-Wesley, 1980. Cité en page 180.

146 C. G. Gray, G. Karl & V. A. Novikov, From Maupertuis to Schrödinger. Quantization of classical variational principles, *American Journal of Physics* **67**, pp. 959–961, 1999. Cité en page 182.

147 La déclaration de Hemingway est rappelée par Marlene Dietrich dans Aaron E. Hotchner, *Papa Hemingway*, Random House, 1966, en partie 1, chapitre 1. Cité en page 182.

148 J. A. Moore, An innovation in physics instruction for nonscience majors, *American Journal of Physics* **46**, pp. 607–612, 1978. Cité en page 182.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

149 Consultez par exemple Alan P. Boss, Extrasolar planets, *Physics Today* **49**, pp. 32–38. Septembre 1996. Les informations les plus à jour peuvent être consultées dans l'encyclopédie des planètes extrasolaires (« Extrasolar Planet Encyclopædia ») maintenue par Jean Schneider sur http://www.obspm.fr/planets à l'Observatoire de Paris. Cité en page 185.

150 Un bon article critique est David W. Hughes, Comets and Asteroids, *Contemporary Physics* **35**, pp. 75–93, 1994. Cité en page 186.

151 G. B. West, J. H. Brown & B. J. Enquist, A general model for the origin of allometric scaling laws in biology, *Science* **276**, pp. 122–126, 4 avril 1997, avec un commentaire à la page 34 du même numéro. Les lois qui gouvernent les propriétés de ramification des vaisseaux sanguins, des systèmes lymphatiques et des systèmes vasculaires dans les plantes sont expliquées. Pour en savoir plus à propos des plantes, lisez également l'article de G. B. West, J. H. Brown & B. J. Enquist, A general model for the structure and allometry of plant vascular systems, *Nature* **400**, pp. 664–667, 1999. Cité en page 187.

152 J. R. Banavar, A. Martin & A. Rinaldo, Size and form in efficient transportation networks, *Nature* **399**, pp. 130–132, 1999. Cité en page 187.

153 N. Moreira, New striders - new humanoids with efficient gaits change the robotics landscape, *Science News Online*, 6 août 2005. Cité en page 188.

154 John Mansley Robinson, *An Introduction to Early Greek Philosophy*, Houghton Muffin 1968, chapitre 5. Cité en page 189.

155 Lisez par exemple B. Bower, A child's theory of mind, *Science News* **144**, pp. 40–41. Cité en page 191.

156 L'ouvrage le plus admirable sur le sujet est le texte de Branko Grünbaum & G. C. Shephard, *Tilings and Patterns*, W.H. Freeman and Company, New York, 1987. Il a été traduit dans plusieurs langues et réédité plusieurs fois. Cité en page 193.

157 U. Niederer, The maximal kinematical invariance group of the free Schrödinger equation, *Helvetica Physica Acta* **45**, pp. 802–810, 1972. Consultez également l'introduction de O. Jahn & V. V. Sreedhar, The maximal invariance group of Newton's equations for a free point particle, http://arxiv.org/abs/math-ph/0102011. Cité en page 199.

158 Ce récit est conté dans l'intéressante biographie d'Einstein écrite par A. Pais, *'Subtle is the Lord...' – The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982. Cité en page 200.

159 W. Zürn & R. Widmer-Schnidrig, Globale Eigenschwingungen der Erde, *Physik Journal* **1**, pp. 49–55, 2002. Cité en page 207.

160 N. Gauthier, What happens to energy and momentum when two oppositely-moving wave pulses overlap ?, *American Journal of Physics* **71**, pp. 787–790, 2003. Cité en page 211.

161 On trouve un résumé récent et instructif sur la recherche actuelle concernant l'oreille et ses détails fonctionnels sur http://www.physicsweb.org/article/world/15/5/8. Cité en page 213.

162 A. L. Hodgkin & A. F. Huxley, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *Journal of Physiology* **117**, pp. 500–544, 1952. Cet article célèbre de biologie théorique contribua à l'attribution du prix Nobel de médecine aux auteurs en 1963. Cité en page 217.

163 T. Filippov, *The Versatile Soliton*, Springer Verlag, 2000. Lisez aussi J. S. Russel, Report of the Fourteenth Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Murray, London, 1844, pp. 311–390. Cité aux pages 217 et 219.

164 N. J. Zabusky & M. D. Kruskal, Interaction of solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states, *Physical Review Letters* **15**, pp. 240–243, 1965. Cité en page 219.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

165 O. Muskens, De kortste knal ter wereld, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde*, pp. 70–73, 2005. Cité en page 219.

166 E. Heller, Freak waves : just bad luck, or avoidable ?, *Europhysics News*, pp. 159–161, septembre-octobre 2005, téléchargeable sur www.europhysicsnews.org. Cité en page 221.

167 Pour en savoir plus sur le canal sonore océanique, lisez le roman de Tom Clancy, *The Hunt for Red October*. Lisez également le manuscrit de physique de R. A. Muller, Government secrets of the oceans, atmosphere, and UFOs, pour cela connectez-vous à l'adresse http://web.archive.org/web/puisrecherchezhttp://muller.lbl.gov/teaching/Physics10/chapters/9-SecretsofUFOs.html, 2001. Cité en page 222.

168 B. Wilson, R. S. Batty & L. M. Dill, Pacific and Atlantic herring produce burst pulse sounds, *Biology Letters* **271**, numéro S3, 7 février 2004. Cité en page 223.

169 Lisez par exemple l'article de G. Fritsch, Infraschall, *Physik in unserer Zeit* **13**, pp. 104–110, 1982. Cité en page 224.

170 Les transformations en ondelettes furent développées par les mathématiciens français Alex Grossmann, Jean Morlet and Thierry Paul. L'article fondateur est A. Grossmann, J. Morlet & T. Paul, Integral transforms associated to square integrable representations, *Journal of Mathematical Physics* **26**, pp. 2473–2479, 1985. Pour une introduction moderne, lisez Stéphane Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999. Cité en page 224.

171 Jay Ingram, *The Velocity of Honey*, Viking, 2003. Cité en page 225.

172 M. Boiti, J. J.-P. Leon, L. Martina & F. Pempinelli, Scattering of localized solitons in the plane, *Physics Letters A* **132**, pp. 432–439, 1988, A. S. Fokas & P. M. Santini, Coherent structures in multidimensions, *Physics Review Letters* **63**, pp. 1329–1333, 1989, J. Hietarinta & R. Hirota, Multidromion solutions to the Davey–Stewartson equation, *Physics Letters A* **145**, pp. 237–244, 1990. Cité en page 225.

173 M. Ausloos, *Proceedings of the Royal Society in London A* **400**, pp. 331–350, 1985. Cité en page 227.

174 T. A. McMahob & J. Tyler Bonner, *Form und Leben – Konstruktion vom Reißbrett der Natur*, Spektrum Verlag, 1985. Cité en page 230.

175 G. W. Koch, S. C. Sillett, G. M. Jennings & S. D. Davis, The limits to tree height, *Nature* **428**, pp. 851–854, 2004. Cité en page 230.

176 Un article élémentaire expliquant la hauteur des arbres est le suivant : A. Mineyev, Trees worthy of Paul Bunyan, *Quantum* pp. 4–10, janvier-février 1994. (Paul Bunyan est un bûcheron et un géant légendaire, il est le héros des pionniers des premières frontières des États-Unis.) Remarquez que l'acheminement des liquides dans les arbres ne fixe aucune limite sur leur hauteur, puisque l'eau est puisée le long des troncs des arbres (excepté au printemps, lorsqu'elle est puisée à partir des racines) par l'évaporation au niveau des feuilles. Cela fonctionne principalement sans aucune limite parce que les colonnes d'eau, quand la nucléation est soigneusement évitée, peuvent être mises sous une tension élastique allant jusqu'à plus de 100 bars, équivalent à une hauteur de 1 000 m. Lisez aussi P. Nobel, *Plant Physiology*, Academic Press, 2nd Edition, 1999. Cité en page 230.

177 De telles informations peuvent être recueillies à partir de l'excellent article synthétique de M. F. Ashby, On the engineering properties of materials, *Acta Metallurgica* **37**, pp. 1273–1293, 1989. Cet article détaille les divers critères généraux qui déterminent le choix des matériaux, et fournit de nombreux tableaux pour guider ce choix. Cité en page 231.

178 Pour une photographie d'un unique *atome* de baryum – appelé Astrid – lisez Hans Dehmelt, Experiments with an isolated subatomic particle at rest, *Reviews of*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990. Pour une photographie antérieure d'un *ion* baryum, consultez W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. E. Toschek & H. Dehmelt, Localized visible Ba^+ mono-ion oscillator, *Physical Review A* **22**, pp. 1137–1140, 1980. Cité en page 233.

179 Des hologrammes d'atomes furent d'abord réalisés par Hans-Werner Fink & al., Atomic resolution in lens-less low-energy electron holography, *Physical Review Letters* **67**, pp. 1543–1546, 1991. Cité en page 233.

180 Un laser à atome unique fut conçu en 1994 par K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari & M. S. Feld, Microlaser : a laser with one atom in an optical resonator, *Physical Review Letters* **73**, p. 3375, 1994. Cité en page 233.

181 La photographie de la page 234 est la première image qui révéla les structures subatomiques (visibles commes des ombres sur les atomes). Elle fut publiée par F. J. Giessibl, S. Hembacher, H. Bielefeldt & J. Mannhart, Subatomic features on the silicon (111)-(7x7) surface observed by atomic force microscopy, *Science* **289**, pp. 422–425, 2000. Cité en page 233.

182 Consultez par exemple C. Schiller, A. A. Koomans, van Rooy, C. Schönenberger & H. B. Elswijk, Decapitation of tungsten field emitter tips during sputter sharpening, *Surface Science Letters* **339**, pp. L925–L930, 1996. Cité en page 234.

183 U. Weierstall & J. C. H. Spence, An STM with time-of-flight analyzer for atomic species identification, MSA 2000, Philadelphia, *Microscopy and Microanalysis* **6**, supplément 2, p. 718, 2000. Cité en page 234.

184 L'état actuel de notre compréhension de la turbulence est décrit dans ... Cité en page 237.

185 K. Weltner, A comparison of explanations of aerodynamical lifting force, *American Journal of Physics* **55**, pp. 50–54, 1987, K. Weltner, Aerodynamic lifting force, *The Physics Teacher* **28**, pp. 78–82, 1990. Allez aussi sur les sites http://user.uni-frankfurt.de/~weltner/Flight/PHYSIC4.htm et http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html. Cité en page 237.

186 Lydéric Bocquet, The physics of stone skipping, *American Journal of Physics* **17**, pp. 150–155, 2003. Le détenteur du record actuel est Kurt Steiner, avec 40 ricochets. Consultez http://pastoneskipping.com/steiner.htm et http://www.stoneskipping.com. Le site http://www.yeeha.net/nassa/guin/g2.html est relatif à un recordman mondial antérieur, Jerdome Coleman–McGhee. Cité en page 239.

187 S. F. Kistler & L. E. Scriven, The teapot effect : sheetforming flows with deflection, wetting, and hysteresis, *Journal of Fluid Mechanics* **263**, pp. 19–62, 1994. Cité en page 241.

188 E. Hollander, Over trechters en zo ..., *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **68**, p. 303, 2002. Cité en page 241.

189 P. Krehl, S. Engemann & D. Schwenkel, The puzzle of whip cracking – uncovered by a correlation of whip-tip kinematics with shock wave emission, *Shock Waves* **8**, pp. 1–9, 1998. Les auteurs ont utilisé des caméras ultra-rapides pour étudier le mouvement du fouet. Une nouvelle perspective a été dévoilée par A. Goriely & T. McMillen, Shape of a cracking whip, *Physical Review Letters* **88**, p. 244301, 2002. Cet article se concentre sur la forme effilée du fouet. Toutefois, le désintérêt pour la houppe – une partie située à l'extrémité du fouet qui est nécessaire pour le faire claquer – dans le dernier article indique qu'il reste encore beaucoup de choses à découvrir. Cité en page 245.

190 S. Dorbolo, H. Caps & N. Vandewalle, Fluid instabilities in the birth and death of antibubbles, *New Journal of Physics* **5**, p. 161, 2003. Cité en page 243.

191 Z. Sheng & K. Yamafuji, Realization of a Human Riding a Unicycle by a Robot, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1319–

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

1326, 1995. Cité en page 247.

192 Sur l'utilisation humaine du monocycle, lisez JACK WILEY, *The Complete Book of Unicycling*, Lodi, 1984, et SEBASTIAN HOEHER, *Einradfahren und die Physik*, Reinbeck, 1991. Cité en page 247.

193 W. THOMSON, Lecture to the Royal Society of Edinburgh, 18 février 1867, *Proceedings of the Royal Society in Edinborough* **6**, p. 94, 1869. Cité en page 247.

194 T. T. LIM, A note on the leapfrogging between two coaxial vortex rings at low Reynolds numbers, *Physics of Fluids* **9**, pp. 239–241, 1997. Cité en page 244.

195 D. KARSTÄDT, F. PINNO, K. P. MÖLLMANN & M. VOLLMER, Anschauliche Wärmelehre im Unterricht : ein Beitrag zur Visualisierung thermischer Vorgänge, *Praxis der Naturwissenschaften Physik* **5-48**, pp. 24–31, 1999, K. -P. MÖLLMANN & M. VOLLMER, Eine etwas andere, physikalische Sehweise - Visualisierung von Energieumwandlungen und Strahlungsphysik für die (Hochschul-)lehre, *Physikalische Blätter* **56**, pp. 65–69, 2000, D. KARSTÄDT, K. P. MÖLLMANN, F. PINNO & M. VOLLMER, There is more to see than eyes can detect : visualization of energy transfer processes and the laws of radiation for physics education, *The Physics Teacher* **39**, pp. 371–376, 2001, Cité en page 251.

196 F. HERRMANN, Mengenartige Größen im Physikunterricht, *Physikalische Blätter* **54**, pp. 830–832, septembre 1998. Consultez également ses notes de cours d'introduction à la physique générale sur le site Web http://www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~didaktik. Cité aux pages 249 et 254.

197 La thermostatique est difficile à apprendre aussi parce qu'elle ne fut pas explorée de manière systématique. Lisez C. TRUESDELL, *The Tragicomical History of Thermodynamics 1822–1854*, Springer Verlag, 1980. Un excellent ouvrage qui approfondit la thermostatique et la thermodynamique est LINDA REICHL, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Cité en page 250.

198 L'expansion des gaz fut la principale méthode utilisée pour la définition de l'échelle de température officielle. Ce n'est qu'en 1990 que d'autres méthodes furent officiellement introduites, telles que la thermométrie à rayonnement total (dans l'intervalle de 140 K à 373 K), la thermométrie à bruit (2 K à 4 K et 900 K à 1 235 K), la thermométrie acoustique (autour de 303 K), la thermométrie magnétique (0,5 K à 2,6 K) et la thermométrie à rayonnement optique (plus de 730 K). La thermométrie à rayonnement constitue toujours une méthode primordiale dans l'intervalle situé autour de 3 K à 1 000 K. Tout cela est expliqué en détail dans R. L. RUSBY, R. P. HUDSON, M. DURIEUX, J. F. SCHOOLEY, P. P. M. STEUR & C. A. SWENSON, The basis of the ITS-90, *Metrologia* **28**, pp. 9–18, 1991. Sur le point d'ébullition de l'eau voyez également la page 351. Cité en page 250.

199 Consultez par exemple le texte captivant de GINO SEGRÈ, *A Matter of Degrees : What Temperature Reveals About the Past and Future of Our Species, Planet and Universe*, Viking, New York, 2002. Cité en page 251.

200 B. POLSTER, What is the best way to lace your shoes ?, *Nature* **420**, p. 476, 5 décembre 2002. Cité en page 255.

201 Consultez par exemple l'article de H. PRESTON-THOMAS, The international temperature scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* **27**, pp. 3–10, 1990, et les errata de H. PRESTON-THOMAS, The international temperature scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* **27**, p. 107, 1990, Cité en page 259.

202 Pour un tour d'horizon, lisez CHRISTIAN ENSS & SIEGFRIED HUNKLINGER, *Low-Temperature Physics*, Springer, 2005. Cité en page 259.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

203 Le célèbre article sur le mouvement brownien qui a tant contribué à la renommée d'Einstein est le suivant : A. Einstein, Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik* **17**, pp. 549–560, 1905. Durant les années qui suivirent, Einstein écrivit une série d'autres articles plus développés sur ce sujet. Par exemple, il publia sa thèse de doctorat de 1905 : A. Einstein, Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Annalen der Physik* **19**, pp. 289–306, 1906, et il corrigea une petite erreur dans A. Einstein, Berichtigung zu meiner Arbeit : 'Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen', *Annalen der Physik* **34**, pp. 591–592, 1911, où, en utilisant des données récentes à l'époque, il trouva la valeur de $6{,}6 \cdot 10^{23}$ pour le nombre d'Avogadro. Cité en page 259.

204 Les premiers tests de cette prédiction furent réalisés par J. Perrin, *Comptes rendus de l'Académie des sciences* **147**, pp. 475–476, et pp. 530–532, 1908. D'une main de maître, il résuma toute cette discussion dans Jean Perrin, *Les atomes*, Librairie Félix Alcan, Paris, 1913. Cité en page 261.

205 Pierre Gaspard & al., Experimental evidence for microscopic chaos, *Nature* **394**, p. 865, 27 août 1998. Cité en page 261.

206 Ces points sont courageusement et clairement abordés, de par son style, par van Kampen, Entropie, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **62**, pp. 395–396, 3 décembre 1996. Cité en page 262.

207 C'est un résultat décevant pour tous les efforts accomplis jusqu'à présent, comme Grégoire Nicolis le souligne toujours dans ses cours universitaires. Seth Lloyd a réuni une liste de 31 définitions proposées pour la complexité, contenant entre autres, la dimension fractale, la complexité grammaticale, la complexité calculatoire, la profondeur thermodynamique. Lisez-en, par exemple, un bref résumé dans *Scientific American* p. 77, juin 1995. Cité en page 263.

208 L'entropie minimum est discutée par L. Szilard, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik* **53**, pp. 840–856, 1929. Cet article incontournable peut également être trouvé en langue anglaise dans ses travaux rassemblés. Cité en page 263.

209 G. Cohen-Tannoudji, *Les constantes universelles*, Pluriel, Hachette, 1998. Lisez aussi L. Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press, 1962. Cité aux pages 263 et 264.

210 Regardez par exemple A. E. Shalyt-Margolin & A. Ya. Tregubovich, Generalized uncertainty relation in thermodynamics, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0307018, ou J. Uffink & van Lith-van Dis, Thermodynamic uncertainty relations, *Foundations of Physics* **29**, p. 655, 1999. Cité en page 264.

211 H. W. Zimmermann, Particle entropies and entropy quanta IV : the ideal gas, the second law of thermodynamics, and the P-t uncertainty relation, *Zeitschrift für physikalische Chemie* **217**, pp. 55–78, 2003, et H. W. Zimmermann, Particle entropies and entropy quanta V : the P-t uncertainty relation, *Zeitschrift für physikalische Chemie* **217**, pp. 1097–1108, 2003. Cité en page 264.

212 B. Lavenda, *Statistical Physics : A Probabilistic Approach*, Wiley-Interscience, New York, 1991. Cité en page 264.

213 Cette citation est relevée dans l'introduction donnée par George Wald au texte de Lawrence J. Henderson, *The Fitness of the Environment*, Macmillan, New York, 1913, réimpression de 1958. Cité en page 265.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

214 L'ouvrage suivant est une introduction captivante à la chimie : John Emsley, *Molecules at an Exhibition*, Oxford University Press, 1998. Cité en page 265.

215 Une excellente introduction à la physique de la chaleur se trouve dans le livre de Linda Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Cité en page 267.

216 Émile Borel, *Introduction géométrique à la physique*, Gauthier-Villars, 1912. Cité en page 268.

217 Consultez V. L. Telegdi, Enrico Fermi in America, *Physics Today* **55**, pp. 38–43, juin 2002. Cité en page 268.

218 K. Schmidt-Nielsen, *Desert Animals : Physiological Problems of Heat and Water*, Oxford University Press, 1964. Cité en page 269.

219 Charles H. Bennett & Rolf Landauer, Fundamental Limits of Computation, *Scientific American* **253 :1**, pp. 48–56, 1985, explique pourquoi de l'entropie est générée lorsque de l'information est effacée, mais pas quand elle est acquise. La conclusion est : nous devrions payer pour jeter la revue, non pour l'acheter. Cité en page 271.

220 Lisez par exemple G. Swift, Thermoacoustic engines and refrigerators, *Physics Today* **48**, pp. 22–28, juillet 1995. Cité en page 274.

221 Cité dans D. Campbell, J. Crutchfield, J. Farmer & E. Jen, Experimental mathematics : the role of computation in nonlinear science, *Communications of the Association of Computing Machinery* **28**, pp. 374–384, 1985. Cité en page 275.

222 Pour en savoir plus à propos des formes des flocons de neige, lisez l'ouvrage de référence de W. A. Bentley & W. J. Humphreys, *Snow Crystals*, Dover Publications, New York, 1962. Cette seconde édition de l'original de 1931 laisse une large place au résultat de la passion de Bentley qui l'a occupé toute sa vie, à savoir plusieurs milliers de photos de flocons de neige. Cité en page 275.

223 K. Schwenk, Why snakes have forked tongues, *Science* **263**, pp. 1573–1577, 1994. Cité en page 275.

224 P. B. Umbanhowar, F. Melo & H. L. Swinney, Localized excitations in a vertically vibrated granular layer, *Nature* **382**, pp. 793–796, 29 août 1996. Cité en page 276.

225 D. K. Campbell, S. Flach & Y. S. Kivshar, Localizing energy through nonlinearity and discreteness, *Physics Today* **57**, pp. 43–49, janvier 2004. Cité en page 277.

226 B. Andreotti, The song of dunes as a wave-particle mode locking, *Physical Review Letters* **92**, p. 238001, 2004. Cité en page 277.

227 K. Kötter, E. Goles & M. Markus, Shell structures with 'magic numbers' of spheres in a swirled disk, *Physical Review E* **60**, pp. 7182–7185, 1999. Cité en page 277.

228 Une bonne introduction est l'ouvrage de Daniel Walgraef, *Spatiotemporal Pattern Formation, With Examples in Physics, Chemistry and Materials Science*, Springer 1996. Cité en page 278.

229 Pour un bon aperçu, lisez la thèse de doctorat de Joceline Lega, *Défauts topologiques associés à la brisure de l'invariance de translation dans le temps*, université de Nice, 1989. Cité en page 279.

230 Une idée des mécanismes fascinants à la base du battement du cœur est fournie par A. Babloyantz & A. Destexhe, Is the normal heart a periodic oscillator ?, *Biological Cybernetics* **58**, pp. 203–211, 1989. Cité en page 280.

231 Pour un bref survol actualisé du phénomène de la turbulence, lisez L. P. Kadanoff, A model of turbulence, *Physics Today* **48**, pp. 11–13, septembre 1995. Cité en page 281.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

232 Pour une introduction limpide, regardez T. Schmidt & M. Mahrl, A simple mathematical model of a dripping tap, *European Journal of Physics* **18**, pp. 377–383, 1997. Cité en page 281.

233 Un aperçu de l'humour en science peut être compulsé dans la célèbre anthologie compilée par R. L. Weber, édité par E. Mendoza, *A Random Walk in Science*, Institute of Physics, 1973. Elle est également disponible dans de nombreuses traductions. Cité en page 282.

234 K. Mertens, V. Putkaradze & P. Vorobieff, Braiding patterns on an inclined plane, *Nature* **430**, p. 165, 2004. Cité en page 283.

235 G. Müller, Starch columns : analog model for basalt columns, *Journal of Geophysical Research* **103**, pp. 15239–15253, 1998. Cité en page 283.

236 B. Hof, van Doorne, J. Westerweel, F. T. M. Nieuwstadt, H. Wedin, R. Kerswell, F. Waleffe, H. Faisst & B. Eckhardt, Experimental observation of nonlinear traveling waves in turbulent pipe flow, *Science* **305**, pp. 1594–1598, 2004. Cité en page 284.

237 Un livre éblouissant à ce sujet est Kenneth Laws & Martha Swope, *Physics and the Art of Dance : Understanding Movement*, Oxford University Press 2002. Cité en page 284.

238 J. J. Lissauer, Chaotic motion in the solar system, *Reviews of Modern Physics* **71**, pp. 835–845, 1999. Cité en page 285.

239 Lisez Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 426. Cité en page 285.

240 Pour avoir une synthèse claire des diverses conventions de signe en relativité générale, lisez la première de couverture de Charles W. Misner, Kip S. Thorne & John A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973. Nous employons les conventions de signe de la gravitation de Hans C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitazione e spaziotempo*, Zanichelli, 1997. Cité en page 289.

241 George Birkbeck Norman Hill, *Johnsonian Miscellanies*, Clarendon Press, 1897, dans *Seward's Biographiana*. Cité en page 289.

242 Le premier enregistrement écrit de la lettre U semble être celui de Leon Battista Alberti, *Grammatica della lingua toscana*, 1442, la première grammaire d'une langue moderne (non latine), rédigée par un génie qui était à la fois intellectuel, architecte et le père de la cryptologie. Le premier enregistrement écrit de la lettre J semble être celui de Antonio de Nebrija, *Gramática castellana*, 1492. Avant de l'écrire, Nebrija vécu pendant dix ans en Italie, de telle sorte qu'il est possible que la distinction I/J soit aussi d'origine italienne. Nebrija était l'un des savants espagnols les plus importants. Cité en page 290.

243 Pour avoir plus d'informations concernant les lettres thorn et eth, jetez un œil sur le vaste exposé qui peut être consulté sur le site Web www.everytype.com/standards/wynnyogh/thorn.html. Cité en page 290.

244 Pour un récit historique moderne de la langue anglaise, lisez David Crystal, *The Stories of English*, Allen Lane, 2004. Cité en page 290.

245 Hans Jensen, *Die Schrift*, Berlin, 1969, traduit en anglais dans *Sign, Symbol and Script : an Account of Man's Efforts to Write*, Putnam's Sons, 1970. Cité en page 291.

246 David R. Lide, éditeur, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 78th edition, CRC Press, 1997. Cette œuvre classique de référence paraît chaque année dans une nouvelle édition. L'alphabet hébreu complet en est donné à la page 2-90. La liste des abréviations des quantités physiques utilisées dans les formules, et approuvée par l'ISO, l'UIPPA et l'UICPA, peut également y être trouvée là.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Cependant la norme internationale ISO 31, qui définit ces abréviations, coûte environ mille euros, n'est pas disponible sur Internet, et par conséquent peut être ignorée sans aucun problème, de même que toutes les normes qui sont supposées être utilisées dans l'enseignement, mais qui restent inaccessibles aux enseignants. Cité aux pages 293 et 295.

247 Lisez le texte formidable de PETER T. DANIELS & WILLIAM BRIGHT, *The World's Writing Systems*, Oxford University Press, 1996. Cité en page 293.

248 Lisez par exemple l'ouvrage fascinant de STEVEN B. SMITH, *The Great Mental Calculators – The Psychology, Methods and Lives of the Calculating Prodigies*, Columbia University Press, 1983. Ce livre expose également les techniques qu'ils utilisent, et que n'importe qui d'autre peut utiliser pour les imiter. Cité en page 295.

249 Consultez par exemple l'article « Mathematical notation » dans l'*Encyclopedia of Mathematics*, 10 volumes, Kluwer Academic Publishers, 1988–1993. Mais avant tout, jetez un œil sur le magnifique site Web très instructif members.aol.com/jeff570/mathsym.html. La principale source de référence de tous ces résultats est le vaste travail exemplaire de recherche de FLORIAN CAJORI, *A History of Mathematical Notations*, 2 volumes, The Open Court Publishing Co., 1928–1929. Le symbole racine carrée est employé dans CHRISTOFF RUDOLFF, *Die Coss*, Vuolfius Cephaleus Joanni Jung : Argentorati, 1525. (Le titre complet était *Behend vnnd Hubsch Rechnung durch die kunstreichen regeln Algebre so gemeinlicklich die Coss genent werden. Darinnen alles so treülich an tag gegeben, das auch allein auss vleissigem lesen on allen mündtlichē vnterricht mag begriffen werden, etc.*) Cité en page 295.

250 J. TSCHICHOLD, *Formenwamdlungen der et-Zeichen*, Stempel AG, 1953. Cité en page 295.

251 MALCOLM B. PARKES, *Pause and Effect : An Introduction to the History of Punctuation in the West*, University of California Press, 1993. Cité en page 295.

252 Cela est expliqué par BERTHOLD LOUIS ULLMAN, *Ancient Writing and its Influence*, 1932. Cité en page 295.

253 PAUL LEHMANN, *Erforschung des Mittelalters – Ausgewählte Abhandlungen und Aufsätze*, Anton Hiersemann, 1961, pp. 4–21. Cité en page 297.

254 BERNARD BISCHOFF, *Paläographie des römischen Altertums und des abendländischen Mittelalters*, Erich Schmidt Verlag, 1979, pp. 215–219. Cité en page 297.

255 HUTTON WEBSTER, *Rest Days : A Study in Early Law and Morality*, MacMillan, 1916. La découverte du jour de malchance dans le royaume de Babylone fut effectuée en 1869 par George Smith, qui redécouvrit aussi la célèbre *Épopée de Gilgamesh*. Cité en page 297.

256 Les corrélations entre des racines grecques et de nombreux termes français – et par conséquent de nombreux mots anglais – peuvent être mises à profit pour construire rapidement un vocabulaire du grec ancien sans faire un travail intense, comme l'indique la collection pratique de J. CHAINEUX, *Quelques racines grecques*, Wetteren – De Meester, 1929. Lisez aussi DONALD M. AYERS, *English Words from Latin and Greek Elements*, University of Arizona Press, 1986. Cité en page 299.

257 Afin d'écrire correctement, lisez WILLIAM STRUNK & E. B. WHITE, *The Elements of Style*, Macmillan, 1935, 1979, ou WOLF SCHNEIDER, *Deutsch für Kenner – Die neue Stilkunde*, Gruner und Jahr, 1987. Cité en page 299.

258 Le Système International d'Unités, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités du SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par ce même organisme. Preuve du lent cheminement d'une vieille institution, le BIPM inaugura son site Web en 1998 seulement, il est dorénavant accessible sur www.bipm.fr. Consultez également la page Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, elle présente les biographies

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

des personnes qui ont donné leur nom aux diverses unités employées. Le site de son homologue britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est nettement mieux : il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités du SI. Cité en page 300.

259 La bible dans le domaine de la mesure du temps est représentée par l'œuvre magistrale en deux volumes de J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte-rendu populaire se trouve dans Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes employés dans cette discipline. Sur les mesures de longueur, voir ... Sur les mesures de précision du courant électrique, voir ... Sur les mesures de masse, notamment atomique, voir la page 61. Sur les mesures de haute précision de la température, voir la page 345. Cité en page 301.

260 Les préfixes non officiels furent proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et devraient se généraliser à l'avenir. Cité en page 302.

261 Pour plus d'informations sur les systèmes d'unités électromagnétiques, consultez le livre de référence de John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3ème édition, Wiley, 1998. Cité en page 305.

262 G. J. Stoney, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* **11**, pp. 381–391, 1881. Cité en page 305.

263 D.J. Bird & al., Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies, *Physical Review Letters* **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cité en page 306.

264 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures, *Physical Review Letters* **70**, pp. 2818–2821, 1993. Lisez également son article dans *Scientific American*, janvier 1994. Cité en page 306.

265 G. Charpak & R. L. Garwin, The DARI, *Europhysics News* **33**, pp. 14–17, janvier/février 2002. Cité en page 306.

266 Les valeurs mesurées des quantités physiques et les plages de valeurs qu'elles prennent sont assemblées dans Horst Völz & Peter Ackermann, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Cité en page 307.

267 Lisez par exemple K. Codling & L. J. Frasinski, Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields, *Contemporary Physics* **35**, pp. 243–255, 1994. Cité en page 308.

268 A. Zeilinger, The Planck stroll, *American Journal of Physics* **58**, p. 103, 1990. Pouvez-vous découvrir un autre exemple similaire ? Cité en page 308.

Défi 569 e

269 L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge à fontaine atomique au césium, avait une précision d'une partie pour 10^{15}. Une précision plus élevée a été prévue comme étant bientôt possible, entre autres par M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, An optical lattice clock, *Nature* **435**, pp. 321–324, 2005. Cité en page 309.

270 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité en page 309.

271 Consultez les informations sur les mésons $D_s^{\pm}$, données par le « particle data group » sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité en page 310.

272 Au sujet de la longue durée de vie du tantale 180, lisez D. Belic & al., Photoactivation of $^{180}Ta^{m}$ and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope, *Physical Review Letters* **83**, pp. 5242–5245, 20 décembre 1999. Cité en page 310.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

273 Consultez l'étude donnée par L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, The detection of gravitational waves, *Reports on Progress in Physics* **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cité en page 310.

274 Lisez l'article clair et approfondi de G. E. Stedman, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* **60**, pp. 615–688, 1997. Cité en page 310.

275 D'après une communication privée de Richard Rusby, c'est la valeur de 1997, alors qu'elle était estimée à 99.975°C en 1989, comme l'indiquent Gareth Jones & Richard Rusby, Official : water boils at 99.975°C, *Physics World* **2**, pp. 23–24, septembre 1989, et R. L. Rusby, Ironing out the standard scale, *Nature* **338**, p. 1169, mars 1989. Pour plus d'informations sur les mesures de température, lisez la page 345. Cité en page 310.

276 J. Short, Newton's apples fall from grace, *New Scientist*, **2098**, p. 5, 6 septembre 1997. Vous trouverez plus de détails dans R. G. Keesing, The history of Newton's apple tree, *Contemporary Physics* **39**, pp. 377–391, 1998. Cité en page 311.

277 Ces divers concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, l'ISO 5725, dont la désignation est *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*. Une excellente introduction en est donnée par John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis : the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité en page 312.

278 P. J. Mohr & B. N. Taylor, CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 1998, *Reviews of Modern Physics* **59**, p. 351, 2000. C'est la compilation des constantes résultant d'un ajustement international et recommandée pour l'usage international par le Comité de données pour la Science et la Technologie (CODATA), un membre du Conseil international pour la science, lequel compte également l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) et d'autres organisations. Le site Web de l'UICPA est www.iupac.org. Cité aux pages 312 et 313.

279 Les détails sont fournis dans la célèbre référence astronomique, Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité en page 317.

280 Pour plus d'informations concernant le nombre π, ainsi que d'autres constantes, la page Web oldweb.cecm.sfu.ca/pi/pi.html donne une grande quantité de données et de références. Elle possède également un lien vers la synthèse qui en est faite sur mathworld.wolfram.com/Pi.html et vers de nombreux autres sites sur ce sujet. Voici quelques formules simples sur π :

$$\pi + 3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\, 2^n}{\binom{2n}{n}} \tag{106}$$

ou l'élégante formule découverte en 1996 par Bailey, Borwein et Plouffe :

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n} \left(\frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6} \right) . \tag{107}$$

Ce site développe aussi les nouvelles méthodes découvertes pour pouvoir calculer des chiffres binaires, choisis au préalable, de π sans avoir à évaluer tous les précédents. En outre, le nombre de chiffres (consécutifs) connus en 1999 était de plus de 1,2 million de millions, tel que le cite *Science News* **162**, p. 255, 14 décembre 2002. Ces méthodes passent avec succès tous les tests aléatoires, comme l'explique le site Web mathworld.wolfram.com/PiDigits.html. Cependant, cette propriété, désignée *normalité*, n'a jamais reçu de démonstration, c'est la plus grande question qui demeure ouverte au sujet de π. Il est probable que la théorie de la dynamique du chaos conduise vers une solution à cette énigme dans les années à venir.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

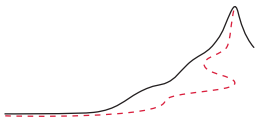
Une autre méthode permettant de calculer π ainsi que d'autres constantes a été découverte et publiée par D. V. Chudnovsky & G. V. Chudnovsky, The computation of classical constants, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* **86**, pp. 8178–8182, 1989. Les frères Chudnowsky avaient mis au point un supercalculateur dans l'appartement de Gregory avec environ 70 000 euros, et détinrent pendant plusieurs années le record du calcul du plus grand nombre de chiffres de π. Ils engagèrent une rude compétition durant plusieurs décennies avec Kanada Yasumasa, qui a battu le record en 2000, en effectuant le calcul sur un supercalculateur de l'industrie. De nouvelles formules pour calculer π sont toujours occasionnellement découvertes.

Pour le calcul de la constante d'Euler γ lisez aussi D. W. DeTemple, A quicker convergence to Euler's constant, *The Mathematical Intelligencer*, pp. 468–470, mai 1993.

Remarquez que nous en savons peu concernant les propriétés élémentaires de certains nombres, par exemple nous ne savons toujours pas si $\pi + e$ est un nombre rationnel ou pas ! (On pense qu'il ne l'est pas.) Voulez-vous devenir un mathématicien ? Cité en page 318.

Défi 570 r
Défi 571 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS

> N'effectuez jamais un calcul avant que vous en connaissiez la réponse.
>
> Devise de John Wheeler

John Wheeler voulait que les gens évaluent, testent et devinent, mais il ne le disait pas ouvertement. Une estimation correcte renforce l'inclination pour la physique, tandis qu'une erronée nous entraîne dans le plaisir de la découverte.

Challenge ??, page **??**: Ces sujets sont tous repris plus loin dans le texte.

Challenge 1, page 9: N'hésitez pas à être revendicatif et strict. La prochaine version en bénéficiera forcément.

Challenge 2, page 16: Il existe de nombreuses façons de distinguer le véritable mouvement d'une illusion de mouvement : par exemple, seul le mouvement réel peut être utilisé pour mettre quelque chose d'autre en mouvement. De plus, les illusions de mouvement des figures font preuve d'un défaut important : rien ne bouge si la tête et la feuille restent fixes l'une par rapport à l'autre. Autrement dit, l'illusion *amplifie* seulement le mouvement existant, il ne *créé* pas de mouvement à partir de rien.

Challenge 3, page 16: Sans faire des expériences précises et détaillées, ces deux positions peuvent trouver des exemples permettant de démontrer la validité de leur point de vue. La création est soutenue par l'apparition de moisissures ou de bactéries dans un verre d'eau, elle est également appuyée par son contraire, à savoir la disparition sans laisser de trace, telle que la disparition du mouvement. Cependant, la conservation est soutenue, et la création contredite, par toutes les investigations qui explorent avec beaucoup de soin des situations présumées d'apparition ou de disparition.

Challenge 5, page 18: Les partis politiques, les sectes, les organismes d'aide et les thérapeutes de toutes sortes ont typiquement ce genre de comportement.

Challenge 6, page 22: Ce problème n'est pas encore entièrement résolu pour le mouvement de l'espace vide, comme dans le cas des ondes gravitationnelles. De toute façon, le vide n'est pas constitué de minuscules particules de taille finie, puisque cela contredirait la propriété de transversalité des ondes gravitationnelles.

Challenge 7, page 24: Cette définition récursive est la suivante : les objets sont définis comme étant ce qui bouge par rapport à la toile de fond de l'espace, et l'arrière-plan est défini comme étant ce qui reste immuable lorsque les objets changent. Nous reviendrons à plusieurs reprises sur cette question primordiale, au cours de notre aventure. Il faudra, malgré tout, une certaine dose de patience pour la résoudre.

Challenge 8, page 26: Les trous ne sont pas des systèmes physiques, parce qu'en général ils ne peuvent pas être traqués.

Challenge 9, page 26: Regardez la page **??**.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

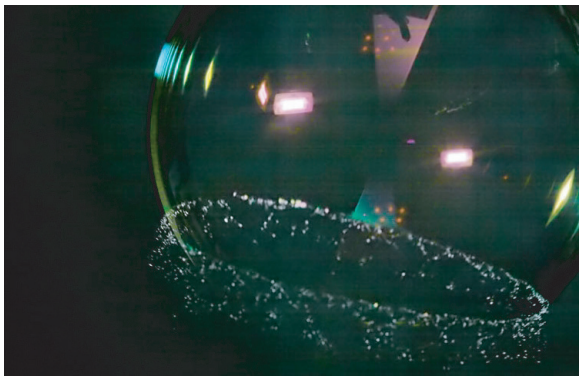


FIGURE 150 Une bulle de savon pendant qu'elle éclate. (© Peter Wienerroither)

Challenge 10, page 26: Un fantôme peut être une image en mouvement, il ne peut pas être un objet en mouvement, car les objets ne peuvent pas s'interpénétrer. Regardez la page **??**.

Challenge 11, page 27: Indice : oui, il existe un tel point.

Challenge 12, page 27: Si quelque chose pouvait cesser d'être en mouvement, le mouvement pourrait disparaître sans laisser de trace. Pour une démonstration précise, nous devrions montrer que tous les atomes ne se déplacent plus. Jusqu'à présent, cela n'a jamais été observé : le mouvement est conservé. (Rien dans la nature ne peut disparaître sans laisser de trace.)

Challenge ??, page **??**: Consultez la Figure 150 pour en voir une image intermédiaire. Une bulle éclate à partir d'un point, puis le bord du trou s'agrandit très rapidement, jusqu'à ce qu'il disparaisse aux antipodes. Pendant ce processus, le reste de la bulle garde sa forme sphérique, comme indiqué dans la figure. Pour voir un film de ce processus, regardez www.youtube.com/watch?v=SpcXtmkk26Q. Autrement dit, les dernières gouttelettes qui sont éjectées proviennent du point de la bulle qui est à l'opposé du point de crevaison, elles ne sont jamais éjectées depuis le centre de la bulle.

Challenge 13, page 27: Cela signifierait en réalité que l'espace est infini, cependant il est impossible d'observer que quelque chose se déplace « pour toujours » : personne ne vit assez longtemps.

Challenge 14, page 27: Comment mesureriez-vous ceci ?

Challenge 15, page 27: Le nombre de chiffres fiables dans un résultat de mesure est une quantification élémentaire de la précision. Vous trouverez plus de détails en cherchant à « écart-type » dans l'index.

Challenge 16, page 27: Non, la mémoire est nécessaire pour l'observation et les mesures. C'est le cas pour les êtres humains et les dispositifs de mesure. La théorie quantique rendra cette affirmation particulièrement claire.

Challenge 17, page 27: Remarquez que vous n'avez jamais observé une vitesse nulle. Il y a toujours une certaine marge d'erreur dans la mesure qui nous empêche d'affirmer que quelque chose vaut zéro. Aucune exception !

Challenge 18, page 28: $(2^{64} - 1) = 18\,446\,744\,073\,700\,551\,615$ grains de riz, étant donné une récolte mondiale de 500 millions de tonnes par an, représentent à peu près 4 000 ans de récoltes de riz. Ce calcul est simplifié par l'utilisation de la formule $1+m+m^2+m^3+\ldots m^n = (m^{n+1}-1)/(m-1)$, donnant la somme de ce que l'on appelle la *série géométrique*. (Cette désignation est historique et est utilisée pour faire la distinction avec la *série arithmétique* $1+2+3+4+5+\ldots n = n(n+1)/2$.) Pouvez-vous démontrer ces deux expressions ?

Challenge 19, page 28: Dans des expériences parfaites, la flamme s'incline vers l'intérieur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Mais de telles expériences ne sont pas faciles à réaliser, et parfois la flamme penche vers l'extérieur. Essayez-le, tout simplement. Pouvez-vous expliquer ces deux observations ?

Challenge 20, page 28: Les accéléromètres sont les détecteurs de mouvement les plus simples. Ils existent sous la forme de dispositifs piézo qui produisent un signal à chaque fois que la boîte est accélérée et peuvent coûter un euro seulement. Un autre accéléromètre qui pourrait avoir du succès à l'avenir est un accéléromètre à interférence qui tire profit du mouvement d'une grille d'interférences, ce dispositif pourrait être intégré dans du silicium. D'autres accéléromètres plus précis utilisent des gyroscopes ou des rayons lasers en boucle.

Les vélocimètres et les détecteurs de position peuvent aussi déceler le mouvement, ils requièrent une roue ou, du moins, un procédé optique permettant d'avoir une vision de l'extérieur de la boîte. Les tachygraphes dans les véhicules sont des exemples de vélocimètres, les souris d'ordinateurs sont des exemples de détecteurs de position.

Un dispositif assez bon marché serait idéal pour mesurer la vitesse des skieurs ou des patineurs. Aucun appareil de ce type n'existe encore.

Challenge 21, page 28: La balle roule vers le centre de la table, puisque ce point est légèrement plus proche du centre de la Terre que le rebord, puis la balle prend de l'élan et effectue une oscillation autour de ce centre. La période est de 84 min, comme l'indique le défi 300. (Cela n'a jamais été observé jusqu'à présent. Pourquoi ?)

Challenge 22, page 28: Seulement si l'accélération ne s'annule jamais. Les accélérations peuvent être ressenties. Les accéléromètres sont des dispositifs qui mesurent les accélérations et déduisent alors la position. On les utilise dans les avions lors des vols qui traversent l'atlantique. Si la boîte n'est pas accélérée, il est impossible de dire si elle bouge ou reste sur place. Il est même impossible de dire dans quelle direction nous nous déplaçons. (Fermez vos yeux dans un train la nuit pour vous en rendre compte.)

Challenge 23, page 28: La longueur de corde nécessaire est nh, où n représente le nombre de roues ou de poulies.

Challenge 24, page 28: Le bloc se déplace deux fois plus rapidement que les cylindres, indépendamment de leur rayon.

Challenge 25, page 28: On sait que cette méthode fonctionne, de la même manière, pour d'autres craintes.

Challenge 26, page 29: Il faut 11 passages pour trois couples. Il en faut 5 pour deux couples. Pour quatre couples ou plus il n'y a pas de solution. Quelle est la solution s'il y a n couples et $n - 1$ places sur le bateau ?

Challenge 79, page 54: Indice : il existe un nombre infini de telles formes. Ces courbes sont aussi appelées *courbes de Reuleaux*. Autre indice : les pièces de 20 p et 50 p en Grande-Bretagne possèdent de telles formes. Eh oui, des formes autres que des cylindres sont également possibles : considérez un cylindre carré torsadé, par exemple.

Challenge 27, page 30: Dans la vie quotidienne, cela est correct. Qu'est-ce qui se passe lorsque les effets quantiques sont pris en considération ?

Challenge 28, page 31: Il n'y a qu'une seule possibilité : comparer la vitesse qui doit être mesurée avec la vitesse de la lumière. En réalité, presque tous les manuels de physique, que ce soit pour le collège et pour l'université, commencent par la définition de l'espace et du temps. Des manuels sur la relativité, excellents par ailleurs, ont des difficultés à se débarrasser de cette habitude, même ceux qui introduisent le *k-calculus* dorénavant standard (lequel constitue, en réalité, l'approche mentionnée ici). L'approche la plus logiquement claire consiste à commencer avec la notion de vitesse.

Challenge 29, page 33: Considérez la variation moyenne de distance entre deux atomes voisins

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

situés dans un morceau de quartz durant le dernier million d'années. Connaissez-vous quelque chose d'encore plus lent ?

Challenge ??, page **??**: Il n'existe aucune manière de ressentir notre propre mouvement si nous sommes dans le vide. Aucune manière en principe. On baptise souvent ce résultat le *principe de relativité*.

Page 84

En fait, il existe une façon de mesurer notre mouvement dans l'espace (même si ce n'est pas le vide) : mesurez votre vitesse par rapport au rayonnement fossile de fond diffus. Ainsi nous devons être prudents avec ce que nous voulons dire.

Challenge ??, page **??**: La charge alaire P/A, le rapport entre le poids P et la surface de portance A, est manifestement proportionnelle à la racine cubique du poids. (En réalité, $P \sim l^3$, $A \sim l^2$, l étant la dimension de l'objet volant.) Cette relation explique la ligne verte de tendance principale.

La charge alaire P/A est, comme toutes les forces dans les fluides, proportionnelle au carré de la vitesse de croisière v : nous avons $P/A = v^2 0{,}38\,\mathrm{kg/m^3}$. Le facteur inexpliqué englobe la densité de l'air et un coefficient numérique général qui est difficile à évaluer. Cette relation relie les échelles horizontales supérieure et inférieure dans le graphique.

Par conséquent, la vitesse de croisière est équivalente à la *racine sixième* du poids : $v \sim P^{1/6}$. Autrement dit, un Airbus A380 est 750 000 millions de fois plus lourd qu'une mouche drosophile, mais seulement une centaine de fois plus rapide.

Challenge 30, page 34: De manière équivalente : les points dans l'espace existent-ils ? L'ultime étape de notre ascension examinera ce problème en détail, regardez la page **??**.

Challenge 31, page 35: Toutes les sources d'électricité doivent utiliser la même phase lorsqu'elles fournissent de la puissance électrique dans le réseau. Les horloges des ordinateurs sur Internet doivent être synchronisées.

Challenge 32, page 36: Remarquez que ce décalage augmente quadratiquement avec le temps, mais pas linéairement.

Challenge 33, page 36: Le temps naturel est mesuré avec le mouvement naturel. Le mouvement naturel est le mouvement de la lumière. Le temps naturel est celui défini à l'aide du mouvement de la lumière.

Challenge 34, page 37: Galilée mesurait le temps avec une balance (et d'autres dispositifs). Son chronomètre était un tube rempli d'eau, dirigé vers un seau, qu'il maintenait fermé avec son pouce. Pour démarrer le chronomètre, il retirait son pouce, pour l'arrêter, il le remettait dessus. Le volume d'eau dans le seau lui donnait alors une mesure de la durée écoulée. Cela est expliqué dans son célèbre ouvrage Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica e i movimenti locali*, généralement simplement appelé les « Discours », qu'il publia en 1638 avec Louis Elsevier à Leyde aux Pays-Bas.

Challenge 35, page 38: Il n'existe aucune manière de définir un temps local aux pôles qui soit cohérent avec tous les points voisins. (Pour les curieux, vérifiez-le sur le site Web www.arctic.noaa.gov/gallery_np.html.)

Challenge 37, page 40: La forêt est emplie de lumière et donc de rayons lumineux : ils sont droits, comme l'indiquent les rayons de soleil de la Figure 151.

Challenge 38, page 40: Une paire de muscles déplace le cristallin le long du troisième axe en déformant l'œil d'une forme oblongue en une forme sphérique, ou aplatie aux pôles.

Challenge 39, page 41: Vous pouvez résoudre cela en tentant de penser en quatre dimensions. Essayez d'imaginer comment permuter la séquence lorsque deux objets traversent une région. Remarque : il est généralement *incorrect*, dans ce domaine, d'utiliser le temps à la place d'une quatrième dimension *spatiale* !

Challenge 40, page 42: Mesurez les distances en utilisant la lumière.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 151 Rayons de soleil dans une forêt. (© Fritz Bieri et Heinz Rieder)

Challenge 43, page 45: Il est plus facile de travailler avec le tore unité. Considérez l'intervalle unitaire $[0,1]$ et assimilez tous les points extrémaux à un seul point. Définissez un ensemble B dont les éléments sont un nombre réel b donné, issu de cet intervalle, plus tous les nombres qui diffèrent de ce réel par un nombre rationnel. Le cercle unité peut être imaginé comme étant l'union de tous les ensembles B. (En réalité, chaque ensemble B est un exemplaire décalé de l'ensemble $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels.) Maintenant construisez un ensemble A en prélevant un élément de chaque ensemble B. Construisez alors la famille d'ensembles constituée de l'ensemble A et de ses copies A_q décalées d'un nombre rationnel q. L'union de tous ces ensembles est le tore unité. Cette famille d'ensembles est infiniment dénombrable. Divisez-la alors en *deux* familles d'ensembles infiniment dénombrables. Il est facile de voir que chacune de ces deux familles peut être renumérotée et ses éléments décalés de telle façon que chacune des deux familles forme un tore unité.

Réf. 35 Les mathématiciens disent qu'il n'existe pas de mesure additive infiniment dénombrable de $\mathbb{R}^n$ ou que les ensembles tel que A ne sont pas mesurables. En raison de cette existence, la « démultiplication » des longueurs est possible. Nous chercherons plus tard à savoir si le pain ou l'*or* peuvent être démultipliés de cette manière.

Challenge 44, page 45: Astuce : commencez avec les triangles.

Challenge 45, page 45: La région située entre l'axe des x et la courbe de la fonction qui assigne 1 à chaque nombre transcendant et 0 à chaque nombre non-transcendant en constitue un exemple.

Challenge 46, page 46: Utilisons la définition de la fonction donnée dans le texte. L'angle dièdre d'un tétraèdre régulier est un multiple irrationnel de π, donc le tétraèdre possède un invariant de Dehn non nul. Le cube possède un angle dièdre de $\pi/2$, donc l'invariant de Dehn du cube est 0. Par conséquent, le cube n'est pas équidécomposable avec le tétraèdre régulier.

Challenge 47, page 47: Si vous pensez que vous pouvez montrer que l'espace vide est continu, vous avez tort. Vérifiez bien vos arguments. Si vous pensez que vous pouvez démontrer le contraire, vous *devez* avoir raison – mais seulement si vous connaissez déjà ce qui sera expliqué dans la dernière partie de ce livre. Si ce n'est pas le cas, vérifiez votre argumentation. (Par la suite, nous découvrirons que le vide possède un contenu en énergie fini. Si le vide était continu, le paradoxe de Banach–Tarski pourrait être mis à profit pour démultiplier l'énergie.)

Challenge 48, page 47: Bien évidemment, nous utilisons la lumière pour vérifier que le fil à plomb est droit, donc les deux définitions doivent être équivalentes. Cela est vrai parce que les lignes du champ de la gravité sont également des trajectoires possibles pour le mouvement de la

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

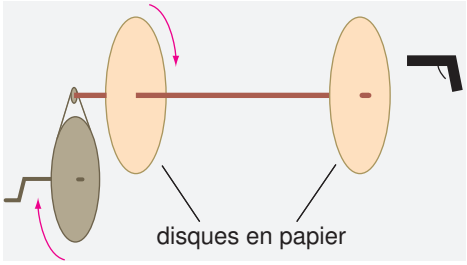


FIGURE 152 Un moyen élémentaire de mesurer la vitesse des balles.

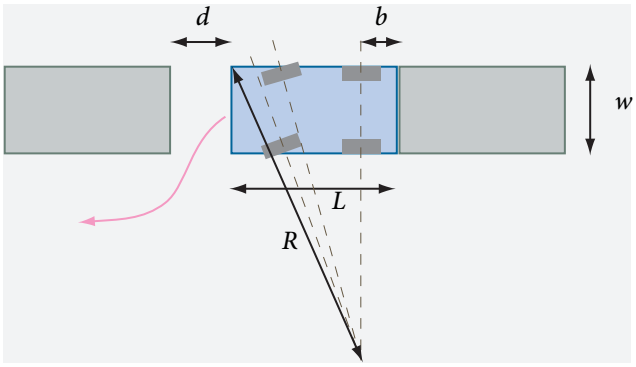


FIGURE 153 Quitter une place de parking – le rayon externe de manœuvre.

lumière. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas : pouvez-vous en repérer les exceptions ?

La surface d'une mer calme constitue une autre manière de contrôler la rectitude.

Un troisième procédé moins précis consiste à faire usage des détecteurs de rectitude situés dans le cerveau. Le cerveau humain possède une faculté innée permettant de déterminer si un objet vu avec les yeux est droit. Il y a des cellules spécifiques dans le cerveau qui s'activent lorsque c'est le cas. N'importe quel ouvrage sur la perception visuelle fournit plus de renseignements sur ce sujet.

Challenge 49, page 48: La théorie de la Terre creuse est correcte si la formule des distances est utilisée de manière cohérente. En particulier, nous devons faire l'hypothèse que les objets deviennent plus petits lorsqu'ils s'approchent du centre de la sphère creuse. De bonnes explications de tous les phénomènes se trouvent sur www.geocities.com/inversedearth. Quelques supports peuvent être trouvés sur Internet, également sous les désignations de système célestiocentrique, théorie du monde intérieur ou théorie de la Terre concave. Il n'existe aucun argument pour préférer une description plutôt que l'autre, excepté peut-être pour des raisons de simplicité et de facilité intellectuelle.

Challenge 51, page 49: Un indice est donné dans la Figure 152. Pour la mesure de la vitesse de la lumière avec une méthode pratiquement identique, consultez la page 19.

Challenge ??, page **??**: L'ours est blanc parce que la maison est évidemment située au Pôle Nord. Mais il existe une infinité d'emplacements supplémentaires (sans présence d'ours) à proximité du Pôle Sud : pouvez-vous les repérer ?

Challenge ??, page **??**: Appelons L la longueur initiale du ruban élastique, v la vitesse de l'escargot par rapport au ruban et V la vitesse du cheval par rapport au sol. La vitesse de l'escargot par rapport au sol est donnée par

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = v + V\frac{s}{L + Vt} \,. \tag{108}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

C'est ce que nous appelons une *équation différentielle* pour la position inconnue de l'escargot $s(t)$. Vous pouvez vérifier – simplement en l'introduisant – que sa solution est donnée par

$$s(t) = \frac{v}{V}(L + Vt)\ln(1 + Vt/L)\,. \tag{109}$$

Par conséquent, l'escargot rattrape le cheval en un temps

$$t_{\text{rattrapage}} = \frac{L}{V}(e^{V/v} - 1) \tag{110}$$

qui est fini pour toute valeur de L, V et v. Vous pouvez vérifier néanmoins que cette durée est, en vérité, extrêmement grande, si des valeurs relativistes pour les vitesses sont utilisées.

Challenge 52, page 49: La couleur est une propriété qui s'applique uniquement aux objets, et non aux frontières des objets. Cette question montre qu'il est facile de poser des questions qui n'ont aucun sens, même en physique.

Challenge 53, page 49: Vous pouvez facilement le faire vous-même. Vous pouvez même trouver des sites Web sur ce sujet.

Challenge 57, page 50: Horloges avec deux aiguilles : 22 fois. Horloges avec trois aiguilles : 2 fois.

Challenge 58, page 50: Pour deux aiguilles, la réponse est 143 fois.

Challenge 59, page 50: La Terre tourne de 15 minutes par minute.

Challenge 60, page 50: Vous pourriez être étonnés, mais aucune donnée fiable n'existe sur cette question. La vitesse la plus élevée concernant un lancer mesuré jusqu'à présent semble être celle d'une balle de cricket à 45 m/s. De l'autre côté, il y a beaucoup plus d'informations disponibles concernant des vitesses atteintes à l'aide de raquettes. Le smash rapide du badminton d'environ 70 m/s semble être un bon candidat pour le record de vitesse à l'aide d'une raquette, les balles de golf atteignent des vitesses similaires.

Challenge 61, page 50: Oui, elle le peut. En réalité, de nombreux chats peuvent également se glisser en dessous.

Challenge 62, page 51: 1,8 km/h ou 0,5 m/s.

Challenge 64, page 51: Cet usage inhabituel reflète l'idée que nous sommes nous-mêmes capables de déterminer notre position, mais pas l'instant auquel nous nous situons. La section sur le déterminisme montrera comment cette distinction est erronée.

Page 164

Challenge 65, page 51: Oui. Cependant, cela n'est pas évident puisque ceci implique que l'espace et le temps ne sont pas continus, contrairement à ce que nous apprenons au collège. Nous trouverons la réponse dans la dernière partie de cet ouvrage.

Challenge 66, page 51: Pour une courbe, utilisez le rayon de courbure, défini en chaque point, du cercle qui se rapproche de la courbe en ce point. Pour une surface, définissez deux directions en chaque point et utilisez également deux cercles le long de ces directions.

Challenge 67, page 51: Elle se déplace d'environ 1 cm en 50 ms.

Challenge 68, page 52: La surface du poumon est comprise entre 100 et 200 m^2, en fonction de la source littéraire, et celle des intestins est comprise entre 200 et 400 m^2.

Challenge 81, page 55: Une telle limite n'existe pas en physique classique. Néanmoins, il y en a une dans la nature, qui émerge dès que les effets quantiques sont pris en considération.

Challenge 69, page 52: La forme finale est un cube plein sans aucun trou.

Challenge 54, page 50: La distance requise est

$$= \sqrt{(L-b)^2 - w^2 + 2w\sqrt{R^2 - (L-b)^2}} - L + b\,, \tag{111}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

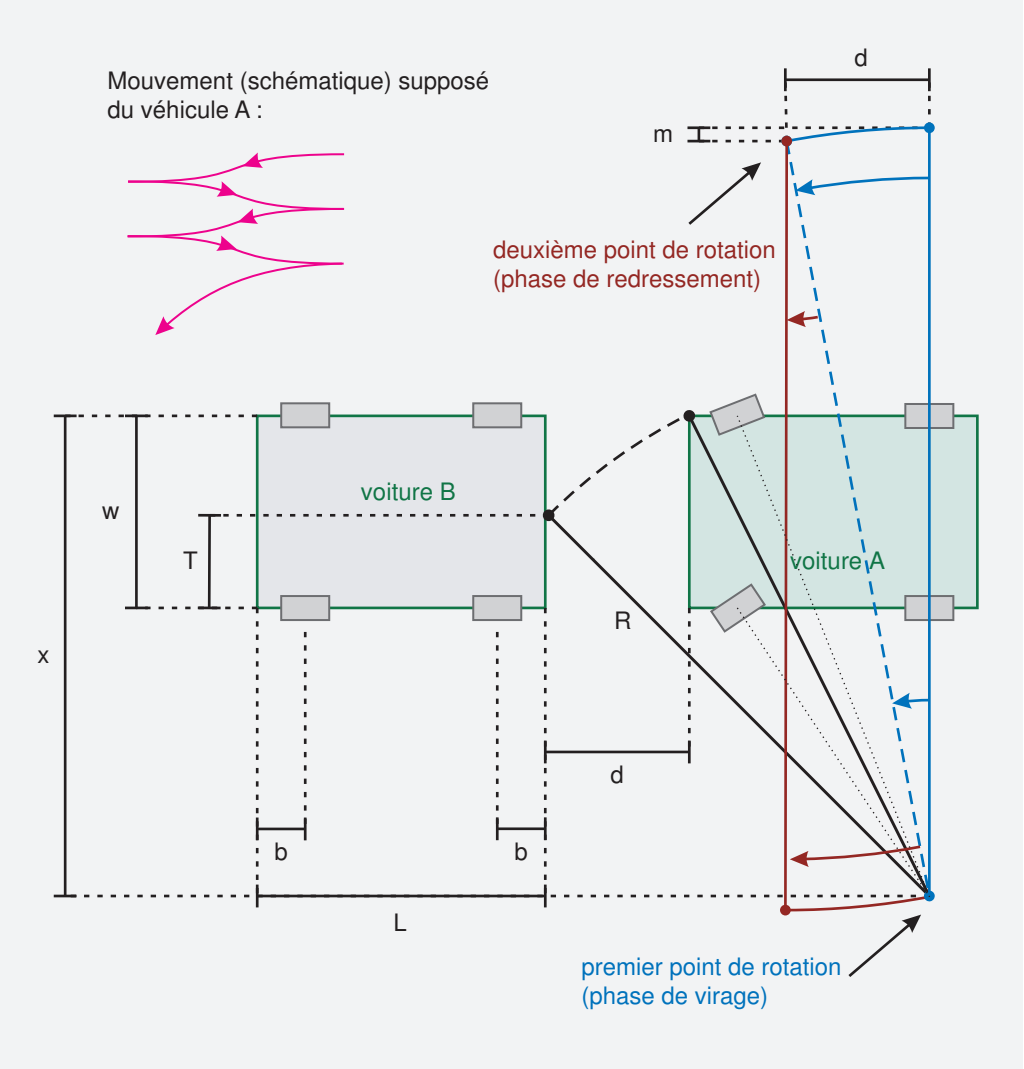


FIGURE 154 Solution de l'énigme du stationnement du véhicule. (© Daniel Hawkins)

comme nous pouvons le déduire de la Figure 153.

Challenge 55, page 50: Un espacement minimum n'existe pas : n'importe quelle valeur conviendra ! Pouvez-vous expliciter cela ?

Challenge 56, page 50: La solution qui suit a été proposée par Daniel Hawkins.

Supposez que vous soyez assis dans une voiture A, stationnée derrière le véhicule B, comme indiqué sur la Figure 154. Il y a deux méthodes élémentaires pour quitter une place de stationnement tout en utilisant la marche arrière : en faisant tourner la voiture pour éloigner le centre de rotation (vers la droite) par rapport à la voiture B et en décalant latéralement la voiture pour éloigner le centre de rotation (plus loin sur le côté) par rapport à la voiture B. La première méthode exige que la voiture A soit partiellement en diagonale, ce qui signifie que cette méthode ne fonctionnera pas pour d inférieur à une certaine valeur, essentiellement celle donnée ci-dessus, lorsque la marche arrière n'est pas requise. Nous nous pencherons donc sur la seconde méthode

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

(dessinée), laquelle fonctionnera pour une valeur infinitésimale de d.

Dans le cas où la distance d est inférieure à la distance minimale requise pour quitter la place de stationnement sans utiliser la marche arrière, pour une géométrie donnée L, w, b, R, un essai pour sortir de la place de parking entraînera que le coin de la voiture A touche la voiture B à une distance T du côté de la voiture B, comme il est indiqué dans la Figure 154. Cette distance T représente la grandeur par laquelle le véhicule A doit être décalé en translation afin de parvenir à quitter l'emplacement de parking.

Le procédé permettant de quitter la place de stationnement, indiqué dans le coin supérieur gauche de la Figure 154, nécessite deux phases pour réussir : la **phase de virage** initiale et la **phase de redressement**. En tournant et en redressant, nous réalisons un décalage vertical vers le bas et un décalage horizontal vers la gauche, tout en préservant l'orientation d'origine. La dernière partie est cruciale parce que si nous tentions de tourner jusqu'à ce que le coin de la voiture A touche la voiture B, celle-ci serait inclinée et tout tentative de redressement suivrait précisément la même trajectoire arquée, vers l'arrière, jusqu'à la position de départ, tandis que le fait de tourner le volant dans l'autre direction permettrait de faire tourner davantage la voiture, comme dans la première méthode décrite ci-dessus.

Notre but est de tourner aussi loin que nous le pouvons et de toujours être capable de redresser complètement avant que le véhicule A ne touche la voiture B. Pour analyser précisément quelle devrait être la grandeur de ce virage, nous devons d'abord examiner les propriétés d'une voiture qui tourne.

L'épure d'Ackermann est le principe qui établit que pour qu'une voiture tourne sans glissement, les quatre roues doivent tourner autour du même point. Cette idée fut brevetée par Rudolph Ackermann en 1817. Certaines propriétés de l'épure d'Ackermann qui sont reliées à ce problème sont les suivantes :

- Les roues arrière restent alignées, mais les roues avant (que nous contrôlons), doivent être inclinées d'un angle différent pour tourner autour du même centre.
- Les centres de rotation pour les virages à gauche et à droite sont situés sur des côtés opposés par rapport à la voiture.
- Pour des grandeurs équivalentes de virages à gauche et à droite, les centres de rotation sont équidistants du côté le plus proche de la voiture. La Figure 154 le montre de façon plus évidente.
- Tous les centres de rotation possibles sont situés sur la même ligne, qui passe aussi toujours par les roues arrière.
- Lorsque les roues arrière sont « droites » (ce qui signifiera par la suite qu'elles possèdent la même orientation qu'en position initiale), elles seront verticalement alignées avec les centres de rotation.
- Lorsque la voiture est en train de tourner autour d'un centre, par exemple celui associé au virage à gauche maximal, alors le centre potentiel associé au virage à droite maximal tournera en même temps que la voiture. De manière similaire, lorsque le véhicule tourne autour du centre droit, le centre gauche tourne.

Maintenant que nous connaissons les propriétés de l'épure d'Ackermann, nous pouvons dire que pour maximiser le décalage vers le bas tout en préservant l'orientation, nous devons tourner à gauche autour du premier centre de telle façon que le second centre tourne d'une distance *horizontale* d, comme indiqué sur la Figure 154. Lorsque cela est fait, nous freinons puis tournons la direction vers le côté complètement opposé de telle manière que nous sommes dorénavant en train de tourner à droite autour du second centre. Parce que nous nous sommes décalés vers la gauche d'une distance d, nous serons parfaitement redressés au moment exact où le véhicule A vient en contact avec la voiture B. C'est ce que nous cherchions, un décalage vers le bas de m et un décalage vers la gauche de d tout en préservant l'orientation de la voiture A. Un procédé

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

analogue peut être exécuté à l'inverse pour accomplir un autre décalage vers le bas de m et un décalage *vers la droite* de d, déplaçant ainsi effectivement le véhicule A vers le bas d'une distance $2m$ à partir de sa position initiale (avant toute manœuvre) tout en retrouvant la même orientation. Ceci peut être réitéré à l'infini, ce qui explique pourquoi il est possible de quitter une place de stationnement avec une distance infinitésimale d entre les voitures A et B. Pour déterminer le nombre de fois où cette procédure (les deux opérations de contournement et de redressement) doit être réalisée, nous devons seulement diviser T (rappelez-vous que T est la distance à laquelle le véhicule A doit être décalé vers le bas afin de tourner définitivement pour quitter l'emplacement de parking) par $2m$, qui représente le décalage total vers le bas pour une itération de cette procédure. Symboliquement,

$$n = \frac{T}{2m}$$

.

Afin d'obtenir une formule où n est une fonction de la géométrie du véhicule, nous devons trouver une expression pour T et $2m$. Pour simplifier les dérivations nous définissons une nouvelle longueur x, également indiquée dans la Figure 154 :

$$x = \sqrt{R^2 - (L-b)^2}$$

$$\begin{aligned} T + (x - w) &= \sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} \\ T &= \sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} - x + w \\ &= \sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} - \sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (x + (x - w)) - m &= \sqrt{(x + (x - w))^2 - d^2} \\ m &= 2x - w - \sqrt{(2x - w)^2 - d^2} \\ &= 2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w - \sqrt{(2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w)^2 - d^2} \\ &= 2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w - \sqrt{4(R^2 - (L - b)^2) - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2} \\ &= 2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w - \sqrt{4R^2 - 4(L - b)^2 - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2} \\ 2m &= 4\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - 2w - 2\sqrt{4R^2 - 4(L - b)^2 - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{T}{2m} \\ &= \frac{\sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} - \sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w}{4\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - 2w - 2\sqrt{4R^2 - 4(L - b)^2 - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2}} \end{aligned}$$

La valeur de n doit toujours être arrondie à l'entier *supérieur* pour déterminer le nombre de fois où nous devons avancer puis reculer pour parvenir à quitter l'emplacement de parking.

Challenge 63, page 51: Rien, ni une preuve ni une réfutation.

Challenge 70, page 52: Regardez la page 20.

Challenge 71, page 52: Un indice pour trouver la solution est donné par la Figure 155.

Challenge 72, page 52: Parce qu'ils sont ou ont été liquides.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

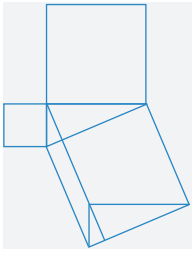


FIGURE 155 Un dessin élémentaire qui démontre le théorème de Pythagore.

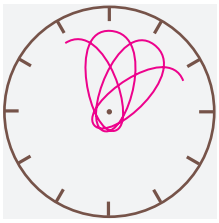


FIGURE 156 La trajectoire du point situé au milieu des deux extrémités des aiguilles d'une horloge.

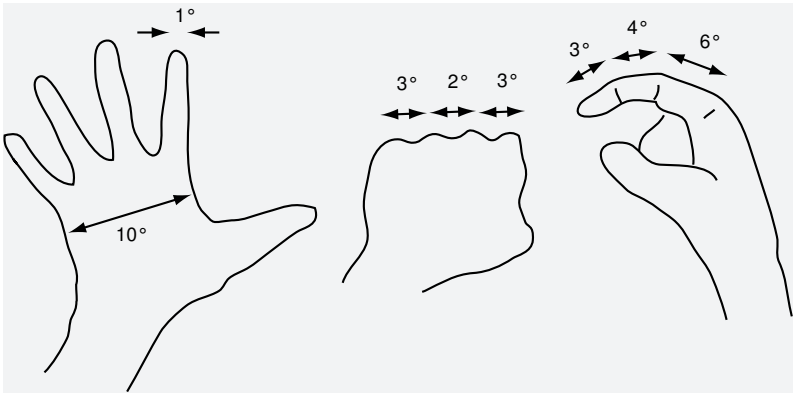


FIGURE 157 Les angles définis par les mains placées vers le ciel, lorsque les bras sont tendus.

Challenge 73, page 52: La forme est indiquée dans la Figure 156 : elle possède onze lobes.

Challenge 74, page 53: L'angle conique φ, c'est-à-dire l'angle entre l'axe et le bord du cône (ou de manière équivalente, la *moitié* de l'angle apical du cône) est relié à l'angle solide Ω par la relation $\Omega = 2\pi(1 - \cos\varphi)$. Invoquez l'aire d'une calotte sphérique pour confirmer ce résultat.

Challenge 76, page 53: Regardez la Figure 157.

Challenge 78, page 53: Astuce : dessinez tous les objets concernés.

Challenge 80, page 54: Cette courbe est bien évidemment appelée caténaire, du latin « catena » qui signifie chaîne. La formule d'une caténaire est $y = a\cosh(x/a)$. Si vous approchez la chaîne par des courts segments droits, vous pouvez fabriquer une arche constituée de blocs en bois qui peuvent se maintenir en place sans recourir à de la colle. L'arche de Saint Louis dans le Missouri a la forme d'une caténaire. Un pont suspendu possède la forme d'une caténaire avant qu'il soit chargé, c'est-à-dire avant que la voie soit attachée à celui-ci. Lorsque le pont est achevé, la forme se situe entre une caténaire et une parabole.

Challenge 82, page 55: L'inverse des rayons, ou courbures, vérifient $a^2+b^2+c^2+d^2 = (1/2)(a+b+c+d)^2$. Cette formule fut découverte par René Descartes. Si nous continuons à placer des cercles dans les espaces vacants, nous obtenons ce que nous appelons des arrangements compacts de cercles, un admirable domaine des mathématiques récréatives. Ils possèdent de nombreuses propriétés surprenantes, telles que les relations intrigantes entre les coordonnées des centres des

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

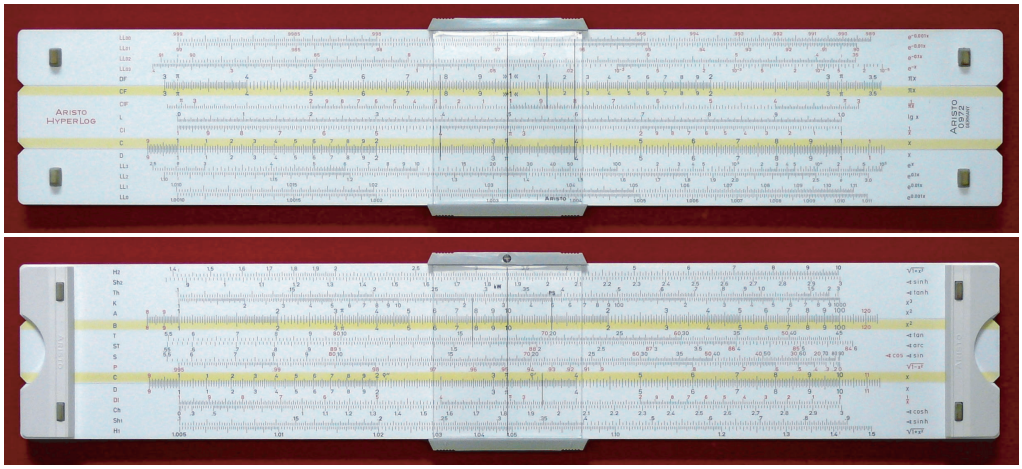


FIGURE 158 Une règle à calcul de haute précision, autour de 1970. (© Jörn Lütjens)

cercles et leurs courbures.

Challenge ??, page **??**: Il y a deux solutions. (Pourquoi ?) Ce sont les deux solutions positives de $l^2 = (b + x)^2 + (b + b^2/x)^2$, la hauteur est alors donnée par $h = b + x$. Les deux solutions sont 4,84 m et 1,26 m. Il existe des formules explicites pour ces solutions : pouvez-vous les découvrir ?

Challenge ??, page **??**: La meilleure méthode consiste d'abord à calculer la hauteur B à laquelle l'échelle bleue touche le mur. Elle est donnée comme étant une solution de $B^4 - 2hB^3 - (r^2 - b^2)B^2 + 2h(r^2 - b^2)B - h^2(r^2 - b^2) = 0$. Les solutions à valeurs entières sont discutées dans MARTIN GARDNER, *Mathematical Circus*, Spectrum, 1996.

Challenge 83, page 55: Une possibilité : utilisez l'analogue tridimensionnel du théorème de Pythagore. La réponse est 9.

Challenge 84, page 55: Dessinez une échelle logarithmique, c'est-à-dire placez chaque nombre à une distance correspondant à son logarithme népérien. Un tel dispositif, appelé *règle à calcul*, est montré sur la Figure 158. Les règles à calcul furent les précurseurs des calculatrices, elles étaient employées partout dans le monde aux époques préhistoriques, c'est-à-dire jusqu'à environ 1970. Consultez également la page Web www.oughtred.org.

Challenge 85, page 55: Deux fois plus. Construisez vous-même une maquette du Soleil et de la Terre pour le vérifier.

Challenge 86, page 55: Le Soleil est exactement dans le dos de l'observateur, il se couche, les rayons proviennent de l'arrière et pénètrent très profondément dans le ciel, dans la direction opposée à celle du Soleil. Une situation légèrement différente – utile également pour se familiariser avec le dessin en perspective – surgit lorsque vous avez un phare dans votre dos. Pouvez-vous l'esquisser ?

Challenge ??, page **??**: Le volume est donné par $V = \int A\mathrm{d}x = \int_{-1}^{1} 4(1 - x^2)\mathrm{d}x = 16/3$.

Challenge ??, page **??**: Oui. Essayez-le avec un modèle en papier.

Challenge 87, page 56: Des problèmes surgissent lorsque les effets quantiques sont ajoutés. Un univers bidimensionnel n'aurait pas de matière, puisque la matière est faite de particules de spin 1/2. Mais celles-ci n'existent pas en deux dimensions. Pouvez-vous repérer d'autres raisons ?

Challenge ??, page **??**: Deux dimensions ne permettent pas d'ordonner des événements. Il devient impossible de dire « avant » et « après ». Dans la vie courante et tous les domaines accessibles aux mesures, le temps est certainement unidimensionnel.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 88, page 58: D'après $x = gt^2/2$ vous obtenez la règle suivante : portez le nombre de secondes au carré, multipliez par cinq et vous obtenez la profondeur en mètres.

Challenge 89, page 58: Expérimentez-le justement.

Challenge 90, page 58: Les académiciens suspendirent un boulet de canon à l'aide d'un mince fil de fer juste en face de l'ouverture du canon. Lorsque le coup de feu fut tiré, le second boulet de canon volant percuta le fil métallique, assurant ainsi que les deux boulets partaient en même temps. Un observateur situé très loin tentait alors de déterminer si les deux boulets touchaient la terre au même instant. Cette expérience n'est pas facile, des minuscules erreurs sur l'angle et dans la résistance de l'air faussent les résultats.

Challenge 91, page 59: Une parabole possède ce que nous dénommons un foyer ou point focal. Toute la lumière émise de ce point, et réfléchie, part dans la même direction : tous les rayons lumineux sont émis parallèlement. Le terme « foyer » – du mot latin *focus* qui désigne cheminée – exprime le fait que c'est le point le plus chaud lorsqu'un miroir parabolique est illuminé. Où se trouve le foyer de la parabole $y = x^2$? (Les ellipses possèdent deux foyers, avec une définition cependant légèrement différente. Pouvez-vous les trouver ?)

Challenge 92, page 60: En négligeant la résistance de l'air et en estimant l'angle à 45°, nous obtenons $v = \sqrt{dg}$, ou environ 3,8 m/s. Cette vitesse est engendrée par un mécanisme de pression intégré, qui utilise la pression sanguine, et qui est soudainement relâché grâce à un système mécanique situé à l'extrémité du tube digestif. La référence citée donne plus d'informations.

Challenge 93, page 60: Sur un sol horizontal, pour une vitesse v et un angle α par rapport à l'horizontale, en négligeant la résistance due à l'air et la hauteur du lanceur, la distance d est donnée par $d = v^2 \sin 2\alpha/g$.

Challenge 94, page 60: Marchez ou courez sous la pluie, mesurez votre vitesse v, et l'angle α selon lequel la pluie semble tomber par rapport à la verticale. La vitesse de la pluie est alors $v_{\text{pluie}} = v/\tan\alpha$.

Challenge 95, page 60: Vérifiez votre calcul grâce à l'information que le record mondial de jonglage en 1998 s'est fait avec 9 balles.

Challenge 96, page 60: Le record du saut en longueur pourrait certainement être amélioré en abandonnant le mètre-ruban sur le sable et en mesurant la véritable distance de saut à l'aide d'un appareil photographique, cela permettrait aux athlètes de courir au plus près de leur vitesse maximale. Le record pourrait également être amélioré par une petite marche inclinée ou par une planche suspendue à un ressort à l'emplacement du décollage, afin d'augmenter l'angle de l'élan.

Challenge 97, page 60: On dit que c'est vrai, puisque les gouttes d'eau seraient alors des sphères de glace et tomberaient avec une vitesse élevée.

Challenge 98, page 60: On trouve des affirmations contradictoires dans la littérature. Le fait est que des gens ont été à l'hôpital parce qu'ils ont reçu une balle en chute libre, qui est allée se loger directement dans leur crâne. (Voyez S. MIRSKY, It is high, it is far, *Scientific American* p. 86, février 2004.) De surcroît, le plomb contenu dans les balles est mauvais pour l'environnement.

Challenge 424, page 230: Pour qu'un animal de masse m puisse sauter, l'énergie E nécessaire est donnée par $E = mgh$, et le travail disponible pour un muscle est approximativement proportionnel à sa masse $W \sim m$. Nous obtenons donc que la hauteur h est indépendante de la masse de l'animal. Autrement dit, l'énergie mécanique spécifique des animaux est de l'ordre de $1{,}5 \pm 0{,}7$ J/kg.

Challenge 99, page 60: Les pierres ne suivent jamais des paraboles : lorsque nous l'étudions scrupuleusement, c'est-à-dire lorsque la variation de g avec la hauteur est prise en considération, leur trajectoire précise se révèle être une ellipse. Cette courbe apparaît de la manière la plus flagrante pour des longs lancers, comme les lancers autour d'une partie significative de la Terre, ou

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pour des objets gravitants. En bref, les pierres suivent des paraboles uniquement si on présume que la Terre est plate. Si sa courbure est prise en compte, elles suivent des ellipses.

Challenge 101, page 63: Un bon candidat d'une accélération faible pour un système physique pourrait être l'accélération mesurée par les détecteurs d'ondes gravitationnelles. Elles sont inférieures à 10^{-13} m/s^2.

Challenge 103, page 64: L'ensemble de toutes les rotations autour d'un point dans un plan constitue véritablement un espace vectoriel. Qu'en est-il de l'ensemble de toutes les rotations autour de *tous* les points situés dans un plan ? Et qu'en est-il concernant les situations tridimensionnelles ?

Challenge 104, page 64: Le produit scalaire entre deux vecteurs **a** et **b** est donné par

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \sphericalangle (\mathbf{a}, \mathbf{b}) \,. \tag{112}$$

En quoi cette forme diffère-t-elle du produit vectoriel ?

Challenge ??, page **??**: En chute libre (lorsque l'air n'est pas présent) ou à l'intérieur d'une station spatiale gravitant autour de la Terre, nous sommes accélérés mais nous ne ressentons rien du tout. En réalité, cette non-différenciation ou cette équivalence entre l'accélération et « l'absence de sensation » a constitué une étape cruciale pour Albert Einstein dans son développement de la relativité générale.

Challenge 105, page 64: Le professeur à l'élève : Quelle est la dérivée de la vitesse ? L'accélération ! Quelle est la dérivée de l'accélération ? Je ne sais pas. Le *jerk* ! Les dérivées quatrième, cinquième et sixième de la position sont parfois dénommées *snap*, *crackle* et *pop*.

Challenge 107, page 66: Nous pouvons argumenter que toute source de lumière doit avoir une taille finie.

Challenge 109, page 66: Ce que l'œil nu humain perçoit comme étant un minuscule point noir est généralement un point de 50 µm environ de diamètre.

Challenge 110, page 66: Voyez la page **??**.

Challenge 111, page 66: Nous devons vérifier attentivement si les étapes conceptuelles qui nous ont conduit à extirper la notion de point à partir des observations sont correctes. Nous verrons dans l'ultime partie de cette aventure que ce n'est pas le cas.

Challenge 112, page 67: Nous pouvons faire tourner la main d'une manière telle que le bras décrive le mouvement détaillé. Regardez également la page **??**.

Challenge 113, page 67: N'importe quel nombre, sans restriction.

Challenge 114, page 67: La circulation sanguine et nerveuse ne serait pas possible si la roue avait un essieu. La méthode indiquée pour éviter d'emmêler les connexions fonctionne uniquement lorsque la partie en rotation *ne* possède *pas* d'essieu : la « roue » doit flotter ou être maintenue en place par d'autres procédés. Il devient donc impossible de concevoir un *essieu* de roue en utilisant un simple morceau de membrane. Et si une roue sans essieu pouvait être construite (ce qui pourrait être possible), alors la roue écraserait régulièrement la connexion. Une telle connexion sans essieu pourrait-elle servir à réaliser une hélice ?

Par ailleurs, il est toujours concevable que des animaux possèdent des roues sur des essieux, si la roue est un objet « inerte ». Même si des technologies d'alimentation sanguine comme les réacteurs à flux continu étaient employés, les animaux ne pourraient pas faire croître une telle roue détachée d'une manière adaptée au reste du corps et ils rencontreraient des difficultés pour reconstituer une roue endommagée. Les roues détachées ne peuvent pousser sur les animaux : elles doivent être inertes.

Challenge 115, page 68: Le cerveau dans le crâne, les fabriques de sang dans les os ou la croissance de l'œil en sont des exemples.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge ??, page **??**: En 2007, les plus vastes grandes roues de fête foraine permettant de transporter des passagers faisaient environ 150 m de diamètre. Les plus grandes éoliennes font environ 125 m de diamètre. Les fours à ciment sont les plus longues roues : elles peuvent faire plus de 300 m le long de leur axe.

Challenge ??, page **??**: La résistance de l'air réduit la distance maximale, laquelle est atteinte pour un angle d'environ $\pi/4 = 45°$, de $v^2/g = 91{,}7$ m environ jusqu'à autour de 50 m.

Challenge 116, page 70: Nous pouvons ajouter également le Soleil, le ciel et le paysage à cette liste.

Challenge 117, page 71: Les fantômes, les hallucinations, les apparitions d'Elvis ou les extraterrestres doivent tous être l'un ou l'autre. Il n'y a pas de troisième alternative. Même les ombres sont simplement des types particuliers d'images.

Challenge 118, page 71: Ce problème fut ardemment débattu au dix-septième siècle, même Galilée postulait que c'était des images. Cependant, ce sont des objets, puisqu'elles peuvent entrer en collision avec d'autres objets, comme l'a montré la collision spectaculaire qui eut lieu entre Jupiter et la comète Shoemaker–Levy 9 en 1994. Depuis ce temps, on a vu des satellites heurter des comètes et elles ont même été prises pour cibles (et frappées).

Challenge 119, page 72: La vitesse minimale est approximativement celle à laquelle il est possible de rouler sans les mains. Si vous faites ainsi, et que vous poussez alors *délicatement* le guidon, vous pouvez reproduire l'expérience décrite ci-dessus. Soyez prudents : une poussée trop forte vous fera gravement chuter.

Challenge 120, page 75: Si la boule en mouvement n'est pas en rotation, après la collision les deux boules repartiront en faisant un angle *droit* entre elles.

Challenge 121, page 76: Une partie de l'énergie est convertie en chaleur, le reste est transféré au bloc de béton sous forme d'énergie cinétique. Comme le bloc est massif, sa vitesse est petite et facilement encaissée par le corps humain. Il paraît que cet effet fonctionne aussi avec des enclumes. Dans une autre variante courante, l'individu n'est pas couché sur des clous, mais est suspendu en l'air : il se maintient horizontalement seulement, avec la tête et les épaules placées sur une chaise, et les pieds sur une autre.

Challenge 122, page 76: Oui, la masse demeure valide aussi pour le magnétisme, parce que la condition exacte n'est pas que l'interaction soit centrale, mais plutôt qu'elle réalise une condition plus générale, qui engendre des accélérations telles que celles produites par le magnétisme. Pouvez-vous déduire cette condition à partir de la définition de la masse ?

Challenge 123, page 78: Le poids décroît à cause de l'eau évaporée, évacuée par la transpiration et, à une échelle plus petite, à cause du carbone expiré qui était lié au dioxyde de carbone.

Challenge 124, page 78: Plutôt que d'utiliser les effets inertiels de la Terre, il est plus facile d'en déduire sa masse à partir de ses effets gravitationnels. Regardez le défi 235.

Challenge 128, page 79: À première vue, la relativité implique que les tachyons possèdent une masse imaginaire. Cependant, ce facteur imaginaire peut être retiré de la relation masse–énergie et masse–quantité de mouvement, de telle sorte que nous pouvons définir une valeur de masse réelle pour les tachyons. Par conséquent plus les tachyons sont rapides et moins ils possèdent d'énergie et de quantité de mouvement. La quantité de mouvement et l'énergie peuvent toutes les deux prendre une valeur négative quelconque.

Challenge 129, page 80: Les jambes n'étant jamais parfaitement verticales, elles glissent immédiatement vers l'extérieur. Une fois que le félidé ou la personne se trouve sur le sol, il est presque impossible de rester debout plus longtemps.

Challenge 130, page 80: La conservation de la quantité de mouvement (du centre de masse) impliquerait que l'environnement tout entier puisse être accéléré dans la direction opposée. La

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

conservation de l'énergie entraînerait qu'une quantité colossale d'énergie puisse être transférée entre les deux emplacements, anéantissant tout ce qui se trouve entre eux. La téléportation contredirait donc la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

Challenge 131, page 81: La fraction des marées due à l'effet du Soleil, du vent solaire et des interactions entre les deux champs magnétiques est un exemple de mécanisme de frottement qui existe entre la Terre et le Soleil.

Challenge 132, page 82: Avec ce facteur 1/2, l'augmentation de l'énergie (physique) cinétique est équivalente au travail (physique) exercé sur un système : l'énergie totale est donc conservée uniquement si nous lui adjoignons le facteur 1/2.

Challenge 134, page 83: C'est une application astucieuse de la conservation de la quantité de mouvement.

Challenge 135, page 83: Ni l'un ni l'autre. Avec les freins serrés, les dégâts sont plus importants, mais toujours répartis de manière équitable entre les deux véhicules.

Challenge 136, page 84: Les appareils de chauffage, les locomotives, les moteurs dans les usines, les fabriques d'acier, les centrales électriques recouvrant les pertes dans le réseau électrique, etc. Par ailleurs, les pays les plus riches dans le monde, tels que la Suède ou la Suisse, consomment moitié moins d'énergie par habitant que les États-Unis. Ce gaspillage constitue une des raisons du niveau de vie moyen inférieur aux États-Unis.

Challenge 138, page 86: Si jamais la Terre voyait sa vitesse de rotation se modifier légèrement et continuellement, nous marcherions penchés, l'eau des océans s'écoulerait vers le nord, les conditions atmosphériques seraient constamment orageuses et des tremblements de terre apparaîtraient à cause de la modification de la forme du globe.

Challenge 140, page 88: Jetez-le simplement en l'air et comparez la dextérité nécessaire pour le faire tourner autour de divers axes.

Challenge 141, page 88: Utilisez la définition du moment d'inertie et le théorème de Pythagore pour chaque élément de masse du corps étudié.

Challenge 142, page 88: Suspendez ce corps en attachant la corde en deux points distincts. Le point de croisement des lignes prolongées de la corde représente le centre de masse.

Challenge 143, page 88: Les sphères possèdent une orientation, parce que nous pouvons toujours ajouter un minuscule point de repère sur leur surface. Cette possibilité n'est pas offerte pour des objets microscopiques, et nous étudierons cette situation dans la partie concernant la théorie quantique.

Challenge 146, page 90: Regardez les tableaux 15 et 16.

Challenge 147, page 90: Le mouvement rectiligne autopropulsé contredit la conservation de la quantité de mouvement, le changement autopropulsé d'orientation (à condition encore une fois que le mouvement cesse) ne contredit aucune loi de conservation. Mais l'explication profonde et ultime de la différence sera dévoilée dans la dernière partie de notre aventure.

Challenge 148, page 90: Oui, le singe peut atteindre la banane. Il a juste besoin de tourner sur lui-même. À chaque tour, le plateau tournera un petit peu plus en direction de la banane. Bien sûr, d'autres méthodes, comme le fait de souffler, d'uriner, etc. dans une direction à angle droit par rapport à l'axe, sont également possibles.

Challenge 150, page 91: Les points qui se déplacent exactement le long de la direction radiale de la roue forment un cercle situé sous l'axe et au-dessus de la jante. Ce sont les points qui sont nets dans la Figure 44 de la page 91.

Challenge 151, page 91: Utilisez la conservation du moment cinétique autour du point de contact. Si on suppose que toute la masse de la roue est située dans la jante, alors la vitesse finale de rotation est la moitié de celle initiale ; elle est indépendante du coefficient de frottement.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 154, page 96: La force de Coriolis peut être perçue comme étant la somme de deux effets distincts, d'intensité égale. Le premier effet est le suivant : dans un référentiel en rotation, la vitesse change dans le temps. Ce qu'un observateur inertiel (qui n'est pas en rotation) considère être une vitesse constante sera considérée par l'observateur en rotation comme une vitesse qui varie avec le temps. L'accélération mesurée par l'observateur en rotation est négative, et proportionnelle à la fréquence angulaire et à la vitesse.

Le deuxième effet est la variation de la vitesse dans l'espace. Dans un référentiel en rotation, des points distincts possèdent des vitesses différentes. Cet effet est négatif et proportionnel à la fréquence angulaire et à la vitesse.

Au final, l'accélération de Coriolis (qui est la force de Coriolis divisée par la masse) est donc $\mathbf{a}_C = -2\omega \times \mathbf{v}$.

Challenge 155, page 97: Un pendule court de longueur L qui se balance en deux dimensions (avec une amplitude ρ et une orientation φ) fait apparaître deux termes supplémentaires dans le lagrangien $\mathcal{L}$:

$$\mathcal{L} = T - V = \frac{1}{2}m\dot{\rho}^2(1 + \frac{\rho^2}{L^2}) + \frac{l_z^2}{2m\rho^2} - \frac{1}{2}m\omega_0^2\rho^2(1 + \frac{\rho^2}{4\,L^2}) \tag{113}$$

où comme d'habitude la fréquence fondamentale est $\omega_0^2 = g/L$ et le moment cinétique est $l_z = m\rho^2\dot{\varphi}$. Ces deux termes auxiliaires disparaissent lorsque $L \to \infty$. Dans cette situation, si le système oscille en formant une ellipse de demi axes a et b, cette ellipse est figée dans l'espace, et la fréquence est ω_0. Pour un pendule de longueur *finie* L, la fréquence s'exprime plutôt comme

$$\omega = \omega_0(1 - \frac{a^2 + b^2}{16\,L^2}) \quad ; \tag{114}$$

qui plus est, l'ellipse tourne avec une fréquence

$$\Omega = \omega\frac{3}{8}\frac{ab}{L^2}\,. \tag{115}$$

(Ces formules peuvent être dérivées en utilisant le principe de moindre action, comme l'ont indiqué C. G. Gray, G. Karl & V. A. Novikov, Progress in classical and quantum variational principles, arxiv.org/abs/physics/0312071.) Autrement dit, un pendule court en mouvement elliptique dénote une précession même *sans* la force de Coriolis. Puisque cette fréquence de précession diminue avec $1/L^2$, cet effet est imperceptible pour des pendules longs, où seule la force de Coriolis demeure. Pour observer l'effet de la force de Coriolis sur un pendule court, nous devons donc faire attention qu'il ne commence pas à osciller selon une orbite elliptique en ajoutant un procédé qui annule ce mouvement elliptique.

Challenge 156, page 97: L'accélération de Coriolis constitue l'explication de la déviation par rapport à la ligne droite. Elle est due à la variation de la vitesse avec la distance à l'axe de rotation. Maintenant imaginez un pendule, situé à Paris, qui se balance dans la direction Nord–Sud avec une amplitude A. À l'extrémité méridionale de cette oscillation, le pendule est éloigné de l'axe d'une distance $A \sin\varphi$, où φ représente la latitude. À ce point de l'oscillation, le pivot du support central dépasse le plan d'oscillation du pendule avec une vitesse horizontale relative donnée par $v = 2\pi A \sin\varphi/23\,\mathrm{h}\,56\,\mathrm{min}$. La période de la précession est donnée par $T_F = v/2\pi A$, où $2\pi A$ est la circonférence de l'enveloppe de la trajectoire du pendule (relativement à la Terre). Cela conduit à $T_F = 23\,\mathrm{h}\,56\,\mathrm{min}/\sin\varphi$. Pourquoi la valeur qui apparaît dans la formule n'est-elle pas 24 h, mais 23 h 56 min ?

Challenge 157, page 97: L'axe demeure figé par rapport aux étoiles éloignées, non par rapport à l'espace absolu (qui est une entité qui ne peut absolument pas être observée).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

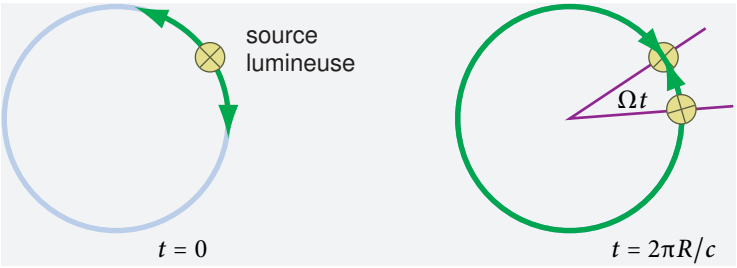


FIGURE 159 Déduction de l'expression de l'effet Sagnac.

Challenge 158, page 98: La rotation entraîne une variation minuscule de la fréquence et donc de la couleur pour la lumière qui circule.

Challenge 159, page 98: Le poids change en allant vers l'est ou lors du déplacement vers l'ouest à cause de l'accélération de Coriolis. Si la vitesse de rotation coïncide avec la fréquence d'oscillation de la balance, cet effet est amplifié par résonance. Cette astuce était également employée par Eötvös.

Challenge 160, page 98: L'accélération de Coriolis fait tourner la barre, car chaque corps en mouvement est dévié vers le côté, et les deux déviations s'additionnent dans ce cas. La direction de la déviation dépend de l'endroit où l'expérience est réalisée, dans l'hémisphère nord ou sud.

Challenge 161, page 98: Lorsqu'on le tourne d'un angle π autour d'un axe Est–Ouest, la force de Coriolis produit une vitesse de dérive du liquide autour du tube. Elle possède la valeur

$$v = 2\omega r \sin\theta, \tag{116}$$

tant que le frottement reste négligeable. Ici ω représente la vitesse angulaire de la Terre, θ la latitude et r le (plus grand) rayon du tore. Pour un tube de 1 m de diamètre en Europe continentale, cela donne une vitesse d'environ $6{,}3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Les mesures peuvent être facilitées si le tube voit son diamètre se restreindre à un unique point, car alors la vitesse augmente dans cette situation. Une diminution de la surface d'un facteur 100 accroît la vitesse du même facteur. Lorsque cette expérience est réalisée, nous devons soigneusement écarter tous les autres effets qui obligent l'eau à se mouvoir, comme par exemple des gradients de température à travers le système.

Challenge 162, page 99: Imaginez que de la lumière décrive une trajectoire circulaire (par exemple, dans une boucle en fibre de verre) et que deux faisceaux se déplacent dans des directions opposées, comme indiqué dans la Figure 159. Si la fibre tourne avec une fréquence de rotation Ω, nous pouvons en déduire que, après un tour, la différence ΔL dans la longueur de la trajectoire est

$$\Delta L = 2R\Omega t = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c} \,. \tag{117}$$

La différence de phase est donc

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi^2 \, R^2}{c\,\lambda}\Omega \tag{118}$$

si l'indice de réfraction est égal à 1. C'est la formule requise pour l'étude du principal cas de l'effet Sagnac.

Challenge ??, page **??**: La tige métallique est légèrement plus longue sur un côté de l'axe. Lorsque le fil qui le maintient est brûlé avec une bougie, son moment d'inertie décroît d'un facteur 10^4, donc il commence à tourner avec une période de rotation (idéalement) de 10^4 fois celle

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de la Terre, une cadence qui est aisément visible en envoyant un rayon lumineux sur le miroir et en observant comment sa réflexion varie sur la paroi.

Challenge 163, page 102: Le résultat original de Bessel était 0,3136″, ou 657,7 mille rayons orbitaux, ce qui l'amena à penser qu'elle était à 10,3 années-lumière ou 97,5 Pm.

Challenge 165, page 105: La galaxie forme une bande laiteuse dans le ciel. Elle est donc une structure aplatie. Cela est encore plus flagrant dans l'infrarouge, comme le montre plus clairement la Figure 73 à la page 197. À partir de cet aplatissement (et de sa symétrie circulaire) nous pouvons en déduire que la galaxie doit être en rotation. Donc il doit y avoir d'autre matière dans l'univers.

Challenge 166, page 106: L'auteur voulait probablement parler du « reste de l'univers ». En réalité, une partie en mouvement ne déplace jamais le centre de gravité d'un système fermé. Mais l'Univers est-il fermé ? Ou est-il un système ? L'ultime partie de notre aventure répondra à ces questions.

Challenge 167, page 106: Indice : une énergie par unité de distance est une force.

Challenge 170, page 106: La balance réagit à votre battement de cœur. Le poids est majoritairement constant au cours du temps, excepté lorsque le cœur bat : pendant une brève durée, le poids est dans une certaine mesure diminué à chaque battement. Cela est apparemment dû au sang qui heurte l'arche aortique lorsque le cœur le pompe vers le haut. La vitesse du sang est d'environ 0,3 m/s lors de la contraction maximale du ventricule gauche. La distance à l'arche aortique est de quelques centimètres. Le temps qui s'écoule entre la contraction et le renversement de la direction est d'environ 15 ms.

Challenge 171, page 107: La conservation du moment cinétique sauve le verre. Essayez-le.

Challenge 172, page 107: Avant toutes choses, les données expérimentales de MacDougall sont déficientes. Dans les six cas que MacDougall examina, il ne connaissait pas l'instant exact du décès. Sa revendication d'une décroissance de la masse ne peut pas être déduite de ses propres informations. Des mesures récentes sur des moutons mourants, qui possèdent à peu près la même masse que les êtres humains, n'ont fait ressortir aucune variation de masse, mais des fluctuations incontestables du poids de quelques douzaines de grammes lorsque le cœur s'arrête. Cette diminution temporaire du poids pourrait s'expliquer par l'exhalation de l'air ou d'humidité, par la relaxation des muscles ou par l'arrêt de la circulation sanguine. Cette question n'est pas élucidée.

Challenge 173, page 107: En considérant une montagne rectangulaire, la hauteur h au-dessus de la croûte attenante et la profondeur d en dessous sont reliées par

$$\frac{h}{d} = \frac{\rho_m - \rho_c}{\rho_c} \tag{119}$$

où ρ_c est la densité de la croûte et ρ_m représente la densité du manteau. Pour les valeurs de densité citées, le rapport est 6,7, conduisant à une profondeur supplémentaire de 6,7 km sous la montagne.

Challenge 177, page 108: Le comportement des sphères peut être expliqué simplement en remarquant que des ondes élastiques se propagent à travers la série de boules. Seule la propagation de ces ondes élastiques, en particulier leur réflexion à l'extrémité de la chaîne, explique que le même nombre de boules qui tapent d'un côté sont soulevées de l'autre. Pour des durées plus longues, le frottement fait que toutes les sphères oscillent en phase. Pouvez-vous confirmer ceci ?

Challenge 178, page 109: Lorsque le cylindre court frappe le long, deux ondes de compression commencent à se propager, à partir du point de contact, à travers les deux cylindres. Lorsque chaque onde de compression parvient à l'extrémité, elle est réfléchie comme une onde d'expansion. Si la géométrie est soigneusement sélectionnée, l'onde d'expansion qui rebrousse chemin dans le cylindre court peut se poursuivre dans le long (lequel est toujours dans sa phase de compression). Pour des temps de contact suffisamment longs, les ondes provenant du cylindre court

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

peuvent donc déposer une grande quantité de leur énergie dans le cylindre long. La quantité de mouvement est conservée, comme l'énergie. Le cylindre long voit sa longueur osciller lorsqu'il se détache, de telle sorte que toute son énergie n'est pas de l'énergie de translation. Cette oscillation est alors exploitée pour enfoncer des clous ou des forets dans des murs en pierre. Dans les perceuses à percussion du marché, des rapports de longueur de 1 pour 10 sont couramment exploités.

Challenge 179, page 109: Le transfert de quantité de mouvement au mur est double quand la balle rebondit parfaitement.

Challenge 180, page 109: Si le bouchon se trouve dans sa position normale : ôtez le couvercle plastique du bouchon, placez le chiffon autour de la bouteille (c'est uniquement pour des raisons de protection) et frappez plusieurs fois la bouteille sur le plancher ou sur une paroi de manière inclinée, comme indiqué sur la Figure 38 de la page 79. À chaque coup donné, le bouchon sortira un petit peu plus.

Si le bouchon est tombé dans la bouteille : placez la moitié du chiffon à l'intérieur de celle-ci, secouez jusqu'à ce que le bouchon tombe sur le chiffon. Tirez ce dernier vers l'extérieur : d'abord lentement, jusqu'à ce qu'il recouvre presque tout le bouchon, puis alors vigoureusement.

Challenge 182, page 110: Le microscope à force atomique.

Challenge 183, page 110: Utilisez la Figure 48 de la page 95 pour la seconde moitié de la trajectoire, puis réfléchissez soigneusement à la première moitié.

Challenge 184, page 110: Indice : le fait de lancer des fusées depuis l'équateur permet d'économiser beaucoup d'énergie, donc du carburant et du poids.

Challenge 185, page 111: Pour un homme qui court : $E \approx 0,5 \cdot 80\,\mathrm{kg} \cdot (5\,\mathrm{m/s})^2 = 1\,\mathrm{kJ}$; pour une balle de fusil : $E \approx 0,5 \cdot 0,04\,\mathrm{kg} \cdot (500\,\mathrm{m/s})^2 = 5\,\mathrm{kJ}$.

Challenge 186, page 111: La flamme s'incline vers l'intérieur.

Challenge 187, page 111: La balle avance dans la direction vers laquelle elle est accélérée. Par conséquent, nous pourrions imaginer que la balle placée dans un verre au repos est tirée vers le haut parce que le plancher est accéléré vers le haut. Nous reviendrons sur cette question dans la section sur la relativité générale.

Challenge 188, page 111: Il double pratiquement de taille.

Challenge 189, page 112: Pour votre examen il vaut mieux dire que la force centrifuge n'existe pas. Mais puisque dans chaque système stationnaire il y a un équilibre entre les forces, cette discussion est en quelque sorte une diversion.

Challenge 191, page 112: Placez les tasses pleines de thé sur une planche et attachez celle-ci à quatre longues cordes que vous gardez en main.

Challenge 192, page 112: Le frottement si les marées sur Terre en constituent la principale cause.

Challenge ??, page **??**: Au point le plus haut, l'accélération est $g \sin\alpha$, où α représente l'angle que fait le pendule au point le plus élevé. Au point le plus bas, l'accélération est v^2/l, où l est la longueur du pendule. La conservation de l'énergie implique que $v^2 = 2gl(1 - \cos\alpha)$. Donc ce problème exige que $\sin\alpha = 2(1 - \cos\alpha)$. Cela aboutit à $\cos\alpha = 3/5$.

Challenge ??, page **??**: Nous avons besoin de l'équation de la variation de la masse $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t = \pi\rho_{\mathrm{vapeur}} r^2 |v|$ due à la vapeur et de l'évolution de la vitesse de la goutte $m\,\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = mg - v\,\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$. Ces deux équations conduisent à

$$\frac{\mathrm{d}v^2}{\mathrm{d}r} = \frac{2g}{C} - 6\frac{v^2}{r} \tag{120}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

où $C = \rho_{\text{vapeur}}/4\rho_{\text{eau}}$. L'astuce consiste à montrer que ceci peut se réécrire ainsi

$$r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\frac{v^2}{r} = \frac{2g}{C} - 7\frac{v^2}{r} \,. \tag{121}$$

Pour des durées assez longues, toutes les solutions physiquement raisonnables s'approchent de $v^2/r = 2g/7C$, cela implique que pour des durées assez longues,

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\frac{v^2}{r} = \frac{g}{7} \quad \text{et} \quad r = \frac{gC}{14}t^2 \,. \tag{122}$$

Concernant ce fameux problème, consultez par exemple B. F. EDWARDS, J. W. WILDER & E. E. SCIME, Dynamics of falling raindrops, *European Journal of Physics* **22**, pp. 113–118, 2001.

Challenge 195, page 113: Un tremblement de terre ayant une magnitude de Richter de 12 représente 1 000 fois l'énergie du séisme chilien de 1960 d'une magnitude de 10. Ce dernier fut provoqué par une fissure, qui se manifesta sur les 40 km de la croûte terrestre, sur une longueur de 1 000 km, le long de laquelle les deux flancs glissèrent de 10 m l'un par rapport à l'autre. Seul l'impact d'une météorite pourrait conduire à des valeurs supérieures à 12.

Challenge 196, page 113: Ce n'est pas facile : le rôle est joué par une association de frottements et de couples. Lisez par exemple l'article J. SAUER, E. SCHÖRNER & C. LENNERZ, Real-time rigid body simulation of some classical mechanical toys, 10th European Simulation and Symposium and Exhibition (ESS '98) 1998, pp. 93–98, ou www.lennerz.de/paper_ess98.pdf.

Challenge 198, page 113: Si une alliance de mariage tourne autour d'un axe qui n'est pas un axe principal, le moment cinétique et la vitesse ne sont pas parallèles.

Challenge 199, page 113: Oui, cela se produit deux fois par an. Pour minimiser les dommages, les paraboles devraient être de couleur noire.

Challenge 200, page 113: Un missile tiré vers l'arrière constituerait un moyen de défense parfait contre les avions qui attaqueraient par l'arrière. Cependant, lorsqu'il est lancé, le missile est réellement en train de voler à reculons par rapport à l'air, ainsi il se retourne et devient alors une menace pour l'avion qui l'a tiré. Les ingénieurs qui n'avaient pas pensé à cet effet ont faillit tuer un pilote au cours du premier test de ce type.

Challenge 202, page 114: Quoi que fasse le singe, qu'il grimpe ou qu'il descende ou même qu'il se laisse chuter, il reste à la même hauteur que la masse. Maintenant, que se passe-t-il s'il y a du frottement au niveau de la poulie ?

Challenge 204, page 114: Pesez la balle de munition et tirez-la contre une masse suspendue au plafond. Nous pouvons déterminer la quantité de mouvement de la balle à partir de la masse et de son angle de déviation.

Challenge 206, page 114: Oui, s'il se déplace à un angle suffisamment grand par rapport à la direction de mouvement du bateau.

Challenge 208, page 115: Le moment d'inertie est $\Theta = \frac{2}{5}mr^2$.

Challenge 209, page 115: Les moments d'inertie sont égaux aussi pour le cube, mais les valeurs sont $\Theta = \frac{1}{6}ml^2$. Les efforts nécessaires pour mettre une sphère et un cube en rotation sont donc différents.

Challenge 210, page 115: Lisez l'article de C. UCKE & H. -J. SCHLICHTING, Faszinierendes Dynabee, *Physik in unserer Zeit* **33**, pp. 230–231, 2002.

Challenge 211, page 115: Lisez l'article de C. UCKE & H. -J. SCHLICHTING, Die kreisende Büroklammer, *Physik in unserer Zeit* **36**, pp. 33–35, 2005.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 212, page 115: Oui. Pouvez-vous imaginer ce qui se passe pour un observateur situé à l'équateur ?

Challenge 213, page 115: Une ligne droite au zénith, et des cercles de plus en plus petits de chaque côté. Un exemple peut être consulté sur le site Web antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap021115.html.

Challenge ??, page **??**: La courbe décrite par le milieu d'une échelle qui glisse le long d'un mur est un cercle.

Challenge 216, page 116: Ce plan est spécifié dans les sites Web mentionnés, pour un homme debout ce plan est le plan vertical contenant les deux yeux.

Challenge ??, page **??**: Ces interrupteurs exploitent la puissance qui est absorbée lorsque l'interrupteur est enfoncé et alimentent ainsi un minuscule émetteur qui actionne une télécommande à haute fréquence pour allumer la lumière.

Challenge ??, page **??**: Elle tire profit d'un ingénieux arrangement de couches bimétalliques. Celles-ci se meuvent chaque fois que la température change entre le jour et la nuit – et vice-versa – et enroulent un ressort d'horloge. L'horloge elle-même est une horloge mécanique ayant une faible consommation d'énergie.

Challenge 217, page 118: Comme nous l'avons dit, les jambes sont plus faciles à faire croître, à entretenir et à réparer que les roues. De surcroît, les jambes n'ont pas forcément besoin de surfaces plates (ce que nous appelons des « rues ») pour agir.

Challenge 218, page 119: La formule de l'escalier est un résultat empirique dévoilé par l'expérience, et est utilisée par les ingénieurs du monde entier. Son origine et son explication paraissent historiquement confuses.

Challenge 219, page 119: La nature classique, ou telle que nous la connaissons dans la vie courante, possède une symétrie droite–gauche et exige donc un nombre pair de jambes. Pour pouvoir marcher sur des surfaces bidimensionnelles il faut naturellement au minimum quatre jambes.

Challenge 221, page 120: La durée du jour varie avec la latitude. De même que la longueur d'une ombre ou la hauteur des étoiles la nuit, des réalités qui sont facilement vérifiées en téléphonant à un ami. Les navires qui émergent de l'horizon font d'abord apparaître leurs mâts. Ces arguments, ajoutés à l'ombre ronde de la Terre au cours d'une éclipse de lune et à l'observation que, quelque soit le lieu, toutes les choses chutent vers le bas, étaient tous déjà consignés par Aristote dans son œuvre *Traité du ciel*. Nous avons dorénavant acquis la certitude que tout le monde au cours des 2 500 dernières années savait que la Terre est sphérique. La légende qui stipule que de nombreux individus continuaient à croire dans une Terre plate fut diffusée dans le monde – comme controverse rhétorique – par Copernic. Ce récit continua alors à être de plus en plus exagéré pendant les siècles qui suivirent, parce qu'un nouveau procédé pour diffuser les mensonges venait juste d'être inventé : l'imprimerie. En vérité, depuis 2 500 ans, l'immense majorité des gens sait que la Terre est une sphère.

Page ??

Challenge 222, page 120: Robert Peary avait oublié qu'à la date où il prétendit se trouver au Pôle Nord, le 6 avril 1909, le Soleil était très bas à l'horizon, il projetait des ombres très longues, d'environ dix fois la hauteur des objets. Mais sur sa photographie les ombres sont beaucoup plus courtes. (En réalité, la photo est prise de manière à masquer toutes les ombres aussi soigneusement que possible.) De façon intéressante, il parvint même à persuader, en 1911, le congrès américain de le déclarer officiellement comme étant le premier homme à se rendre au Pôle Nord. (Un concurrent avait proclamé l'avoir atteint auparavant, mais sa photographie révélait la même erreur.) Peary frauda également sur les distances parcourues les quelques jours précédents l'arrivée, il négligea aussi de mentionner que durant les derniers jours il était tiré par son partenaire Matthew Henson, parce qu'il n'était plus capable de marcher. En réalité Matthew Henson avait plus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de mérite pour cette aventure que Peary. Henson, toutefois, ne savait pas que Peary mentait sur la position qu'ils avaient atteint.

Challenge 223, page 120: Oui, cet effet a été mesuré pour des gratte-ciels. Pouvez-vous en estimer les grandeurs ?

Challenge 224, page 122: La pointe du vecteur vitesse, lorsque son évolution dans le temps est dessinée, engendre un cercle autour du centre de mouvement.

Challenge ??, page **??**: Dessinez une figure de cette situation.

Challenge ??, page **??**: Encore une fois, dessinez une figure de cette situation.

Challenge 227, page 122: La valeur du produit GM pour la Terre est $4{,}0 \cdot 10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$.

Challenge 228, page 122: Tous les points peuvent être atteints pour des inclinaisons en général, mais lorsqu'on tire horizontalement dans une direction donnée, seuls les points situés sur la première moitié de la circonférence peuvent être atteints.

Challenge 230, page 123: Sur la Lune, l'accélération gravitationnelle est de $1{,}6\ \mathrm{m/s^2}$, environ un sixième de la valeur sur Terre. Les valeurs de l'accélération gravitationnelle à la surface des planètes peuvent être trouvées sur de nombreux sites Internet.

Challenge 231, page 123: La réponse est la machine d'Atwood : deux masses pratiquement égales m_1 et m_2 sont reliées par une ficelle enroulée autour d'une poulie bien graissée, de masse négligeable. La masse la plus lourde chute très lentement. Pouvez-vous montrer que l'accélération a de cette chute « non libre » est donnée par $a = g(m_1 - m_2)/(m_1 + m_2)$? Autrement dit, plus la différence de masse est petite, plus la chute est lente.

Challenge 232, page 124: Vous devriez impérativement essayer de comprendre l'origine de cette expression. Elle permet d'appréhender un grand nombre de concepts essentiels de la mécanique. L'idée est que pour des petites amplitudes, l'accélération d'un pendule de longueur l est causée par la gravité. Le dessin d'un diagramme des forces agissant sur un pendule à un angle quelconque α révèle que

$$\begin{aligned} ma &= -mg\sin\alpha \\ ml\frac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}t^2} &= -mg\sin\alpha \\ l\frac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}t^2} &= -g\sin\alpha\ . \end{aligned} \tag{123}$$

Pour les petites amplitudes dont nous avons fait allusion (en deçà de 15°), nous pouvons faire l'approximation

$$l\frac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}t^2} = -g\alpha\ . \tag{124}$$

C'est l'équation d'une oscillation harmonique (c'est-à-dire d'une oscillation sinusoïdale). Le mouvement qui en résulte est :

$$\alpha(t) = A\sin(\omega t + \varphi)\ . \tag{125}$$

L'amplitude A et la phase φ dépendent des conditions initiales, toutefois la fréquence d'oscillation est déterminée par la longueur du pendule et l'accélération de la gravité (vérifiez-le !) :

$$\omega = \sqrt{\frac{l}{g}}\ . \tag{126}$$

(Pour des amplitudes arbitraires, la relation est beaucoup plus complexe : consultez Internet ou des ouvrages spécialisés de mécanique pour plus de détails.)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 233, page 124: La vitesse de la marche est proportionnelle à l/T, ce qui fait qu'elle est proportionnelle à $l^{1/2}$.

Challenge 235, page 125: Cavendish suspendit une tige horizontale dotée d'une masse à chaque extrémité, avec un long fil métallique. Il approcha alors une grosse masse à ce pendule de torsion, en éliminant soigneusement tous les courants d'air, et mesura de quel angle la tige avait tourné.

Challenge 236, page 125: L'accélération due à la gravité est $a = Gm/r^2 \approx 5\,\mathrm{nm/s^2}$ pour une masse de 75 kg. Pour une mouche de masse $m_{\mathrm{mouche}} = 0{,}1\,\mathrm{g}$ qui se pose sur une personne avec une vitesse $v_{\mathrm{mouche}} = 1\,\mathrm{cm/s}$ et qui déforme la peau (sans perte d'énergie) de $d = 0{,}3\,\mathrm{mm}$, une personne serait accélérée de $a = (v^2/d)(m_{\mathrm{mouche}}/m) = 0{,}4\,\mu\mathrm{m/s^2}$. La perte d'énergie due à la collision inélastique réduit cette valeur au moins d'un facteur dix.

Challenge 238, page 127: La manière la plus facile de se le représenter consiste à imaginer la gravité comme un flux qui émane d'une sphère. Cela donne une dépendance en $1/r^{d-1}$ pour la force et donc une dépendance en $1/r^{d-2}$ pour le potentiel.

Challenge 240, page 129: Puisque les trajectoires de la chute libre sont des ellipses, lesquelles sont des courbes contenues dans un plan, cela est trivial.

Challenge 242, page 131: La faible accélération gravitationnelle de la Lune, $1{,}6\,\mathrm{m/s^2}$, implique que des molécules de gaz aux températures courantes peuvent échapper à son attraction.

Challenge 243, page 132: Un flash lumineux est envoyé vers la Lune, où plusieurs réflecteurs ont été installés par les missions Lunokhod et Apollo. La précision de la mesure du temps que met un flash pour aller et revenir est suffisante pour évaluer la variation de la distance de la Lune. Pour plus d'informations, allez au défi 8.

Challenge ??, page **??**: Les points de Lagrange L4 et L5 sont situés sur l'orbite, à 60° devant et derrière le corps qui gravite. Ils sont stables si le rapport entre la masse du corps central et celui du corps gravitant est suffisamment grand (supérieur à 24,9).

Challenge ??, page **??**: Le point de Lagrange L3 est situé sur l'orbite, mais exactement de l'autre côté du corps central. Le point de Lagrange L1 est placé sur la ligne qui rejoint la planète au corps central, tandis que L2 se tient à l'extérieur de l'orbite, sur la même ligne. Si R est le rayon de l'orbite, la distance entre le corps qui gravite et le point L1 ou L2 est $\left(\frac{m}{3M}\right)^{1/3} R$, ce qui donne environ 4 fois la distance de la Lune pour le système Soleil–Terre. L1, L2 et L3 sont des points instables, mais des orbites stables existent effectivement autour d'eux. De nombreux satellites tirent profit de ces propriétés, y compris le célèbre satellite WMAP qui a mesuré les fluctuations du Big Bang, qui est situé au point L2.

Challenge 250, page 136: C'est un effet de résonance, de la même manière que la petite vibration d'une ficelle peut engendrer une grande oscillation de l'air et faire caisse de résonance dans une guitare.

Challenge ??, page **??**: L'expression de la grandeur des marées, à savoir $2GM/d^3$, peut être réexprimée ainsi : $(8/3)\pi G\rho(R/d)^3$. Maintenant, R/d est approximativement identique pour le Soleil et pour la Lune, comme le montre chaque éclipse. Donc la densité ρ doit être beaucoup plus élevée pour la Lune.

Challenge 252, page 138: Le moment cinétique total de la Terre et de la Lune doit demeurer constant.

Challenge 451, page 241: Soit ils sont tombés sur des pentes inclinées de montagnes enneigées, soit ils sont tombés dans des arbres très hauts ou d'autres structures molles. Le record fut de plus de 7 km de chute libre sans dommages. Une affaire récente fit la une en 2007 et est contée dans www.bbc.co.uk/jersey/content/articles/2006/12/20/michael_holmes_fall_feature.shtml.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 160 La célèbre « comète des vomissements », un KC-135, qui réalise un vol parabolique. (NASA)

Challenge ??, page **??**: Pour quelques milliers d'euros, vous pouvez ressentir la gravité zéro dans un vol parabolique, tel que celui indiqué dans la Figure 160. (De nombreuses « photographies » de vols paraboliques glanées sur Internet sont en réalité des images virtuelles. Qu'en est-il de celle-ci ?)

Challenge 258, page 143: Le centre de masse d'un balai chute en suivant l'accélération habituelle, l'extrémité chute donc plus rapidement.

Challenge 259, page 143: Utilisez simplement la conservation de l'énergie pour les deux masses, celle du sauteur et celle de la corde. Pour plus de détails, y compris la confrontation de la théorie aux mesures expérimentales, consultez N. Dubelaar & R. Brantjes, De valversnelling bij bungee-jumping, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **69**, pp. 316–318, octobre 2003.

Challenge 260, page 143: Environ 1 tonne.

Challenge 261, page 144: Environ 5 g.

Challenge 262, page 144: Votre poids est approximativement constant, donc la Terre doit être ronde. Sur une Terre plate, le poids varierait d'un endroit à l'autre, en fonction de votre distance à la bordure.

Challenge 263, page 144: Jamais personne n'a affirmé que le centre de masse est la même chose que le centre de gravité ! L'attraction de la Lune est négligeable à la surface de la Terre.

Challenge 265, page 144: C'est la masse de la Terre. Retournez tout simplement la table sur sa tête.

Challenge ??, page **??**: Oui ! Considérez les formules des marées, et utilisez le fait que la Lune et le Soleil possèdent la même taille apparente dans le ciel.

Challenge 268, page 144: La Lune sera éloignée d'environ 1,25 fois la distance actuelle. Le Soleil ralentira alors la fréquence de rotation du système Terre–Lune, cette fois à cause du frottement de marée beaucoup plus faible au niveau de la déformation du Soleil. Par conséquent, la Lune recouvrera des distances de plus en plus petites à la Terre. Néanmoins, d'ici là, le Soleil sera devenu une géante rouge, après avoir ingurgité à la fois la Terre et la Lune.

Challenge 270, page 145: Comme Galilée l'a déterminé, pour une oscillation (d'une demi-période) le rapport est $\sqrt{2}/\pi$. (Regardez le défi 232.) Mais nous ne pouvons calculer de cette manière guère plus de deux décimales, peut-être trois, du nombre π.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 161 L'analemme photographié, à l'heure locale de midi, de Janvier à Décembre 2002, au Parthénon sur l'Acropole d'Athènes. (© Anthony Ayiomamitis)

Challenge 271, page 145: La conservation de la quantité de mouvement n'est pas un obstacle, étant donné que n'importe quelle raquette de tennis a le même effet sur une balle de tennis.

Challenge 272, page 145: En fait, dans l'espace des vitesses, les mouvements elliptique, parabolique et hyperbolique sont tous décrits par des cercles. Dans tous les cas, l'hodographe est un cercle.

Réf. 99

Challenge 273, page 145: Cette question est ancestrale (elle était déjà soulevée du temps de Newton) et profonde. Une raison est que les astres restent séparés par la rotation autour de la galaxie. L'autre est que les galaxies restent distantes par la quantité de mouvement qu'elles ont acquis lors du Big Bang. Sans ce dernier, toutes les étoiles se seraient effondrées les unes dans les autres. En ce sens, le Big Bang peut être déduit de l'attraction de la gravitation et du ciel immuable la nuit. Nous apprendrons plus tard que l'obscurité du ciel nocturne apporte une deuxième pièce à conviction à l'existence du Big Bang.

Challenge 274, page 145: À cause de la présence du plateau, la masse effective de la Terre est supérieure.

Challenge 275, page 145: L'alternative est claire dès que vous remarquez qu'il n'y a pas de section de l'orbite qui soit concave en direction du Soleil. Pouvez-vous montrer cela ?

Challenge 276, page 146: Il serait alors un trou noir : aucune lumière ne peut s'en échapper. Nous discutons en détail des trous noirs dans le chapitre sur la relativité générale.

Challenge 277, page 146: Une tige reliée à deux corps.

Challenge 280, page 146: En utilisant une hauteur maximale de saut de $h = 0{,}5\,\mathrm{m}$ sur Terre et une densité estimée pour l'astéroïde de $\rho = 3\,\mathrm{Mg/m^3}$, nous obtenons un rayon maximal de $R^2 = 3gh/4\pi G\rho \approx 703\,\mathrm{m}$.

Challenge ??, page **??**: La forme d'une analemme à l'heure locale de midi est montrée dans la Figure 161. L'extension verticale de l'analemme est due à l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur (elle est de 23,45°), et l'extension horizontale est due à l'ellipticité de l'orbite autour du Soleil.

Challenge 281, page 148: Pour chaque paire d'éléments opposés de la coquille (dessinés en jaune), les deux attractions se compensent.

Challenge 282, page 148: Il n'existe aucun procédé applicable. Si les masses sur la coquille pouvaient se déplacer le long de la surface (de la même manière que les charges peuvent se mouvoir dans un métal) cela pourrait être possible, à condition qu'une masse suffisante soit disponible.

Challenge 283, page 149: La capture d'un corps fluide reste possible s'il est étiré par des forces de marée.

Challenge 284, page 149: Ce tunnel serait une ellipse allongée située dans le plan de l'équateur, s'étalant d'un point de l'équateur au point situé aux antipodes. Le temps nécessaire pour effec-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tuer une révolution ne changerait pas, comparé à une Terre non-rotative. Lisez A. J. SIMONSON, Falling down a hole through the Earth, *Mathematics Magazine* 77, pp. 171–188, juin 2004.

Challenge 286, page 149: Le centre de masse du Système solaire peut être éloigné du double du rayon du Soleil à partir de son centre, il peut donc être situé à l'extérieur du Soleil.

Challenge 287, page 150: *Primo*, au cours de la période estivale nordique, la Terre se déplace plus rapidement autour du Soleil que pendant la période hivernale nordique. *Secundo*, les orbites solaires peu profondes dans le ciel donnent des jours plus longs grâce à la lumière qui provient du Soleil lorsqu'il est situé sous l'horizon.

Challenge 288, page 150: Mis à part la visibilité de la Lune, aucun effet sur les êtres humains n'a jamais été décelé. Les effets gravitationnels – y compris les forces de marée – les effets électriques, magnétiques et les variations dans le rayonnement cosmique sont tous largement noyés par d'autres effets. En réalité, la gravité exercée par les camions qui circulent, les champs électromagnétiques des usines, les intempéries et les variations du cycle solaire ont des répercussions plus profondes que la Lune sur les êtres humains. L'ajustement du cycle menstruel avec la phase lunaire est un pur effet de l'imagination.

Challenge 289, page 150: Il était ardu de mesurer les distances. Nous observons sans problème qu'une planète se trouve devant le Soleil, mais il est difficile de vérifier si une planète est située derrière le Soleil.

Challenge 290, page 150: Consultez la référence mentionnée.

Challenge 291, page 150: C'est vrai.

Challenge 295, page 151: Jamais. La Lune montre toujours la même face à la Terre. La Terre change légèrement de position, à cause de l'ellipticité de l'orbite de la Lune. Évidemment, la Terre exhibe des phases.

Challenge ??, page **??**: Oui nous le pourrions, et cela a été maintes et maintes fois imaginé, à commencer par Jules Verne. La vitesse nécessaire dépend de la direction du tir par rapport à la rotation de la Terre.

Challenge 297, page 151: Ce qui compte c'est la verticalité *locale*. Par rapport à celle-ci, la rivière s'écoule toujours en descendant.

Challenge 298, page 151: Il n'existe pas de tels corps, comme le démontrera le chapitre sur la relativité générale.

Challenge 300, page 154: Cette oscillation est une oscillation purement harmonique ou sinusoïdale, puisque la force de rappel augmente linéairement avec la distance au centre de la Terre. La période T pour une Terre homogène est $T = 2\pi\sqrt{R^3/GM} = 84\,\mathrm{min}$.

Challenge 301, page 154: La période est la même pour tous les tunnels de ce type et donc, en particulier, elle est identique car la période de 84 min est valide également pour le tunnel allant d'un pôle à l'autre. Lisez par exemple, R. H. ROMER, The answer is forty-two – many mechanics problems, only one answer, *Physics Teacher* **41**, pp. 286–290, Mai 2003.

Challenge 302, page 154: Il n'y a pas de réponse simple : la vitesse dépend de la latitude et d'autres paramètres.

Challenge ??, page **??**: La force centrifuge doit être égale à la force gravitationnelle. Notons d la densité linéaire constante et l la longueur inconnue. Nous avons alors $GMd\int_R^{R+l} \mathrm{d}r/r^2 = \omega^2 d\int_R^{R+l} r\,\mathrm{d}r$. Cela donne $GMdl/(R^2 + Rl) = (2Rl + l^2)\omega^2 d/2$, entraînant $l = 0{,}14\,\mathrm{Gm}$.

Challenge ??, page **??**: Les anneaux intérieurs doivent tourner plus vite que les anneaux extérieurs. Si ceux-ci étaient solides, ils se déchireraient. Mais ce raisonnement est correct uniquement si les anneaux sont situés en deçà d'une certaine limite, que nous appelons la *limite de Roche*. La

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

limite de Roche représente le rayon pour lequel la force gravitationnelle F_g contrebalance la force de marée F_m à la surface du satellite. Pour un satellite de masse m et de rayon r, gravitant autour d'une masse centrale M à une distance d, étudions les forces qui agissent sur une petite masse μ située sur sa surface. Nous obtenons la condition $Gm\mu/r^2 = 2GM\mu r/d^3$. Avec un peu de calcul algébrique, nous obtenons la limite de Roche

$$d_{\text{Roche}} = R(2\frac{\rho_M}{\rho_m})^{1/3} \,. \tag{127}$$

En dessous de cette distance à une masse centrale M, les satellites fluides ne peuvent subsister. Le calcul exposé ici n'est qu'une approximation, la véritable limite de Roche est égale à environ deux fois cette valeur.

Challenge 304, page 157: En réalité les muscles maintiennent un objet au-dessus du sol en le soulevant et en le relâchant continuellement : cela requiert de l'énergie et du travail.

Challenge 305, page 157: La consommation électrique d'un escalier roulant qui monte s'accroît en vérité lorsque la personne située dessus marche vers le haut. Mais de combien ?

Challenge 306, page 157: La connaissance c'est le pouvoir, donc la puissance. Le temps c'est de l'argent. Maintenant, la puissance est définie comme étant le travail effectué par unité de temps. En insérant les équations précédentes et en effectuant la transformation appropriée nous obtenons

$$\text{argent} = \frac{\text{travail}}{\text{connaissance}} \,, \tag{128}$$

ce qui démontre que moins vous savez, plus vous gagnez de l'argent. Cela explique pourquoi les scientifiques ont des salaires bas.

Challenge 309, page 158: L'absence de frottement statique empêcherait le fait que le fluide environnant s'accroche au corps, ce que nous dénommons la couche limite n'existerait plus. Les ailes n'auraient alors plus aucun effet.

Challenge 310, page 161: Vrai ?

Challenge 314, page 161: En partant de $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = g - v^2(1/2c_wA\rho/m)$ et en utilisant la notation $c = 1/2c_wA\rho$, nous pouvons résoudre l'équation pour $v(t)$ en plaçant tous les termes qui contiennent la variable v d'un côté, tous les termes en t de l'autre, et en intégrant des deux côtés de l'équation. Nous obtenons $v(t) = \sqrt{gm/c}\tanh\sqrt{cg/m}\,t$.

Challenge 316, page 163: L'espace des phases possède $3N$ coordonnées de position et $3N$ coordonnées de quantité de mouvement.

Page ?? **Challenge 317**, page 163: Le moulin à lumière en représente un exemple.

Challenge 318, page 163: La charge électrique.

Challenge 319, page 164: Si vous avez trouvé des raisons pour répondre par l'affirmative, quelque chose vous a échappé. Approfondissez vos arguments et vérifiez si les concepts que vous utilisez s'appliquent à l'Univers. Définissez soigneusement, également, ce que vous entendez par « Univers ».

Challenge 321, page 165: L'existence d'un système qui exhibe un mouvement d'énergie ou de matière plus rapide que la lumière entraînerait que, pour de tels systèmes, il existe des observateurs pour lesquels l'ordre entre la cause et l'effet est inversé. Un diagramme d'espace-temps (et un peu d'exercice tiré de la section sur la relativité restreinte) montre cela.

Challenge 322, page 166: Si la reproductibilité n'existait pas, nous aurions des difficultés à vérifier les observations. La lecture d'une horloge est également une observation. La correspondance entre la reproductibilité et le temps deviendra cruciale dans la dernière partie de notre aventure.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

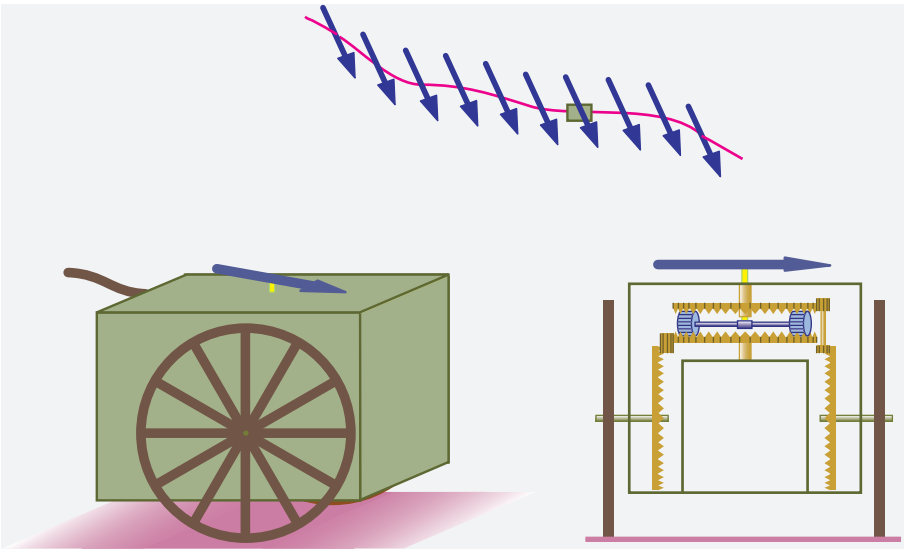


FIGURE 162 Le mécanisme situé à l'intérieur du chariot qui indique le sud.

Challenge 323, page 167: Même si les surprises étaient rares, chacune d'elle ferait qu'il est impossible de définir le temps juste avant et juste après elle.

Challenge 326, page 167: Bien sûr, les lois morales sont des condensés de ce que les autres pensent ou feront à propos des agissements personnels.

Challenge 327, page 168: L'espace-temps est défini en faisant appel à la matière, la matière est définie en faisant usage de l'espace-temps.

Challenge 328, page 168: En réalité la physique a été fondée sur une définition récursive pendant des centaines d'années. Il est donc possible malgré tout de bâtir une science exacte sur des fondements instables. Néanmoins, l'élimination de cette boucle est un objectif important.

Challenge 568, page 330: Par exemple, la vitesse à l'intérieur des matériaux est diminuée, mais entre les atomes, la lumière voyage toujours à la vitesse qu'elle a dans le vide.

Challenge 331, page 170: La Figure 162 révèle la reconstitution la plus vraisemblable d'un chariot qui pointe vers le sud.

Challenge 332, page 171: L'eau se redresse le long des côtés de l'œuf en rotation. La manière la plus rapide de vider une bouteille d'eau consiste à mettre l'eau en rotation tout en la déversant.

Challenge 333, page 171: La bonne réponse est celle où la cheminée tombe comme un V, et non pas comme un V inversé. Regardez le défi 258 sur les balais qui chutent en guise d'inspiration sur la manière de déduire la solution. Il s'avère que la cheminée se brise (si elle n'est pas scellée à sa base) à une hauteur comprise dans la moitié ou les deux tiers de la hauteur totale, en fonction de l'angle auquel cette chute se produit. Pour une solution exhaustive à ce problème, lisez l'excellent article de G. Vareschi & K. Kamiya, Toy models for the falling chimney, *American Journal of Physics* **71**, pp. 1025–1031, 2003.

Challenge 341, page 180: En une dimension, l'expression $F = ma$ peut être réécrite $-\mathrm{d}V/\mathrm{d}x = m\mathrm{d}^2x/\mathrm{d}t^2$. Et cela peut se réexprimer ainsi $\mathrm{d}(-V)/\mathrm{d}x - \mathrm{d}/\mathrm{d}t[\mathrm{d}/\mathrm{d}\dot{x}(\frac{1}{2}m\dot{x}^2)] = 0$. Nous pouvons extrapoler ce résultat en $\partial/\partial x(\frac{1}{2}m\dot{x}^2 - V(x)) - \mathrm{d}/[\partial/\partial\dot{x}(\frac{1}{2}m\dot{x}^2 - V(x))] = 0$, ce qui représente l'équation de Lagrange appliquée à cette situation.

Challenge 343, page 181: Ne vous affligez pas. Jusqu'à présent, personne n'a été capable d'imaginer un univers (ce qui n'est pas nécessairement la même chose qu'un « monde ») différent de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

celui que nous connaissons. Jusque là, ces tentatives ont toujours abouti à des incohérences logiques.

Challenge 345, page 182: Les deux sont équivalents puisque les équations du mouvement découlent du principe de moindre action et, parallèlement, le principe de moindre action dérive des équations du mouvement.

Challenge 347, page 183: Pour la gravitation, les trois phénomènes existent : rotation dans les galaxies, pression dans les planètes et pression de dégénérescence de Pauli dans les astres. Contrairement à l'interaction forte, le principe de Pauli agit dans les noyaux et dans les étoiles à neutron. Dans ces dernières il est probable que la rotation et la pression complètent également la pression de Pauli. Mais pour l'interaction électromagnétique il n'y a pas de composés autres que notre matière de la vie courante, laquelle est organisée uniquement par le principe de Pauli.

Challenge 349, page 186: Le moment cinétique est la variation par rapport à l'angle, tandis que l'énergie cinétique de rotation est, une nouvelle fois, la variation par rapport au temps, comme toute forme d'énergie.

Challenge 350, page 186: Pas de cette manière. Un minuscule changement peut avoir un effet gigantesque, comme l'indique chaque interrupteur. Mais un minuscule changement dans le cerveau peut être transmis vers l'extérieur, et cela se produira approximativement avec une dépendance en $1/r^2$. Cela rend les effets si imperceptibles, que même avec les interrupteurs les plus sensibles – lesquels de toute façon n'existent pas pour la pensée – aucun effet ne peut être accompli.

Challenge 354, page 188: La relation est

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\alpha_2} \,. \tag{129}$$

Le rapport spécifique des vitesses entre l'air (ou le vide, ce qui est à peu près la même chose) et un matériau donne l'*indice de réfraction n* :

$$n = \frac{c_1}{c_0} = \frac{\sin \alpha_1}{\alpha_0} \,. \tag{130}$$

Challenge 355, page 188: Les gaz sont essentiellement constitués de vide. Leur indice de réfraction est proche de un.

Challenge 356, page 188: Les diamants étincellent aussi parce qu'ils agissent comme les prismes : des couleurs différentes possèdent des indices de réfraction distincts. Donc leur éclat est également dû à leur dispersion, par conséquent il est un mélange de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Challenge 357, page 188: Le principe sous-jacent à la croissance des arbres est simplement celui du minimum de l'énergie potentielle, puisque l'énergie cinétique est négligeable. La croissance des vaisseaux sanguins dans le corps des animaux est minimisé pour l'énergie de transport : c'est encore une fois un principe minimal. La réfraction de la lumière est la trajectoire du temps le plus court, donc elle minimise aussi le changement, si nous nous représentons la lumière comme des entités mobiles qui se meuvent, sans que l'on fasse appel à l'énergie potentielle.

Challenge 358, page 188: La relativité restreinte requiert l'existence d'une mesure invariante de l'action. Elle est présentée plus loin dans cette excursion.

Challenge 359, page 188: L'Univers n'est pas un système physique. Nous disserterons en détail de ce problème plus tard. Page ??

Challenge ??, page **??**: Utilisez soit la substitution $u = \tan t/2$ ou employez l'astuce historique suivante $\sec \varphi = \frac{1}{2}\left(\frac{\cos \varphi}{1+\sin \varphi} + \frac{\cos \varphi}{1+\sin \varphi}\right)$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 360, page 189: Nous parlons à une personne parce que nous savons que quelqu'un peut nous comprendre. Donc nous supposons d'une certaine manière qu'elle perçoit les mêmes choses que nous. Cela signifie que l'observation est partiellement indépendante du point de vue. Donc la nature est symétrique.

Challenge 361, page 190: La mémoire fonctionne parce que nous savons reconnaître des situations. Cela est possible car des situations demeurent identiques au cours du temps. La mémoire n'aurait jamais évolué sans cette reproductibilité.

Challenge 362, page 191: Les différences de goût ne sont pas fondamentales, mais dues à des points de vue différents et – principalement – aux expériences disparates des observateurs. La même chose reste valable pour les sentiments et les jugements, comme le confirmera n'importe quel psychologue.

Challenge 363, page 193: Les nombres entiers sous l'addition forment un groupe. L'ensemble des couleurs de peinture sur la palette d'un peintre, doté de l'opération de mélange, forme-t-il un groupe ?

Challenge 364, page 193: Il n'y a qu'une seule opération de symétrie : une rotation de π environ autour du point central. C'est la raison pour laquelle on appellera plus tard le groupe D_4 groupe de symétrie approximatif.

Challenge 370, page 197: Un scalaire représente la grandeur de tout vecteur, donc la grandeur du vecteur-vitesse, définie comme étant $v = |\mathbf{v}|$, est un scalaire, alors que le vecteur vitesse $\mathbf{v}$ ne l'est pas. Ainsi la longueur d'un vecteur (ou pseudo-vecteur) quelconque, tel que la force, l'accélération, le champ magnétique ou le champ électrique, est un scalaire, tandis que le vecteur lui-même n'est pas un scalaire.

Challenge 373, page 198: La distribution de charge d'un corps étendu peut être vue comme la somme d'une charge, d'une charge dipolaire, d'une charge quadrupolaire, d'une charge octupolaire, etc. Le quadrupôle est décrit par un tenseur.

Faites le rapprochement : l'inertie, qui s'oppose au mouvement, d'un corps étendu peut être vue comme la somme d'une masse, d'une masse dipolaire, d'une masse quadrupolaire, d'une masse octupolaire, etc. La masse quadrupolaire est décrite par le moment d'inertie.

Challenge 377, page 201: La charge conservée pour l'invariance par rotation est le moment cinétique.

Challenge 380, page 205: Une oscillation possède une période dans le temps, c'est-à-dire une symétrie de translation discrète du temps. Une onde possède à la fois une symétrie de translation discrète du temps et de translation discrète de l'espace.

Challenge 381, page 205: Le renversement du mouvement est une symétrie pour tout système fermé. En dépit des observations de la vie courante, des formulations de la thermodynamique et de la conviction de plusieurs physiciens célèbres (qui forment cependant une minorité), tous les systèmes idéalement fermés sont réversibles.

Challenge 390, page 211: L'énergie potentielle provient de la « courbure » du milieu : un simple déplacement ne produit aucune courbure et donc ne contient pas d'énergie. Seul le gradient renferme la notion de courbure.

Challenge 392, page 211: La phase change de π.

Challenge 394, page 212: Les ondes peuvent être amorties jusqu'à des intensités extrêmement faibles. Si cela n'est pas possible, alors l'objet de l'observation n'est pas une onde.

Challenge 395, page 213: La manière d'observer la diffraction et l'interférence avec vos mains nues est explicitée à la page **??**.

Challenge 401, page 220: Si la distance à l'amplificateur est de quelques mètres, et la distance

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à l'orchestre de 20 m, comme pour ceux qui peuvent se le permettre, l'auditeur situé chez lui l'entend le premier.

Challenge 403, page 220: Une ellipse (comme pour les planètes autour du Soleil) avec le point d'attache pour centre (contrairement aux planètes, où le Soleil est situé à l'un des foyers de l'ellipse).

Challenge 406, page 221: La détonation du tonnerre ou le brouhaha de la circulation automobile voit sa fréquence se réduire de plus en plus avec l'augmentation de la distance.

Challenge 408, page 221: Ni l'une ni l'autre, ces deux possibilités vont à l'encontre des propriétés de l'eau : dans les vagues de surface, les molécules d'eau se déplacent en cercles.

Challenge 409, page 222: Les nageurs sont capables de parcourir une distance de 100 m en 48 s, soit légèrement mieux que 2 m/s. Avec une longueur corporelle d'environ 1,9 m, la vitesse critique est 1,7 m/s. Cela explique pourquoi pour une courte distance de natation, l'entraînement est important. Pour des distances plus longues la technique joue un rôle prépondérant, car la vitesse critique n'a pas encore été atteinte. Cette formule prédit également que sur une distance de 1 500 m, un nageur de 2 m de hauteur possède un avantage potentiel de plus de 45 s sur un autre d'une hauteur corporelle de 1,8 m. De surcroît, les nageurs plus hauts possèdent un privilège supplémentaire : ils nagent sur des distances plus courtes (pourquoi ?). On prévoit donc que les champions de la nage de longue distance deviendront de plus en plus grands au cours du temps. C'est déplorable pour un sport qui a pu jusqu'à présent se vanter d'avoir eu des champions de toutes les tailles et carrures corporelles, contrairement à de nombreux autres sports.

Challenge 411, page 223: Pour atténuer les réflexions sonores et donc les effets de résonance. Ils diffusent efficacement les fronts d'ondes qui s'approchent.

Challenge 413, page 223: Les vagues dans une rivière ne sont jamais elliptiques, elles restent circulaires.

Challenge 414, page 223: La lentille est un coussin de matériau qui est « transparent » au son. La vitesse du son est plus rapide dans ce coussin que dans l'air, contrairement à une lentille optique, où la vitesse de la lumière est inférieure dans le verre. La forme est donc différente : le coussin doit ressembler à une lentille biconcave.

Challenge 416, page 223: Le Soleil se trouve toujours à une position différente de celle où nous le voyons. Quel en est l'écart, mesuré en diamètres angulaires du Soleil ?

Challenge 417, page 223: Le cube $3 \times 3 \times 3$ possède un système rigide de trois axes perpendiculaires, sur lequel un carré peut tourner sur chacune des 6 extrémités. Les autres carrés sont fixés à des pièces se déplaçant autour de ces axes. Le cube $4 \times 4 \times 4$ est différent cependant, vérifiez-le. Jusqu'ici, la limite sur le nombre de segments semble être de 6. Un cube $7 \times 7 \times 7$ nécessite des segments de forme variable. Mais nous ne trouvons pas dans les magasins de cubes supérieurs à $5 \times 5 \times 5$. En contrepartie, le site Web www.oinkleburger.com/Cube/applet permet de jouer avec des cubes virtuels pouvant aller jusqu'à $100 \times 100 \times 100$ voire plus.

Challenge 419, page 224: Un tour d'horizon des systèmes en cours de test en ce moment peut être lu dans K.-U. Graw, Energiereservoir Ozean, *Physik in unserer Zeit* **33**, pp. 82–88, février 2002. Lisez aussi Oceans of electricity – new technologies convert the motion of waves into watts, *Science News* **159**, pp. 234–236, avril 2001.

Challenge 420, page 225: Dans la vie quotidienne, cette supposition est généralement justifiée, puisque chaque point peut être approximativement représenté par un atome, et les atomes peuvent être pistés. Cette hypothèse est discutable dans les situations telle que la turbulence, où tous les points ne peuvent être assimilés à des atomes, et par dessus tout, dans le cas du mouvement du vide lui-même. Autrement dit, pour les ondes gravitationnelles, et en particulier pour la théorie quantique des ondes gravitationnelles, cette supposition n'est pas justifiée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 422, page 227: Il y en a plein. L'une d'elles serait que la transmission et donc le coefficient de réflexion pour des ondes serait à peu près indépendant de la longueur d'onde.

Challenge 423, page 228: Une goutte d'un diamètre de 3 mm recouvrirait une surface de 7,1 m^2 d'un film de 2 nm.

Challenge 426, page 231: La hauteur critique d'une colonne de matière est donnée par $h_{crit}^4 = \frac{\beta}{4\pi g} m \frac{E}{\rho^2}$, où $\beta \approx 1,9$ est la constante déterminée par le calcul lorsqu'une colonne cède sous son propre poids.

Challenge 429, page 233: Une possibilité consiste à décrire les particules que nous voyons comme des objets étendus, donc comme des nuages. Une autre en est donnée dans la dernière partie de ce texte.

Challenge 431, page 237: Cette constante k découle de la conservation de l'énergie et de celle de la masse : $k = \sqrt{2/(\rho(A_1^2/A_2^2 - 1))}$. Les sections efficaces sont notées A, l'indice 1 se réfère à n'importe quel point éloigné du rétrécissement, et l'indice 2 au rétrécissement.

Challenge ??, page **??**: Des personnes constatent que dans certaines situations le frottement est trop important, et commencent à aspirer par une extrémité du tube pour faire en sorte que l'écoulement s'initie, ce faisant elles peuvent inhaler ou avaler de l'essence, ce qui est toxique.

Challenge 433, page 238: Jeter la pierre fait baisser le niveau, jeter l'eau ou le morceau de bois le laisse inchangé.

Challenge 434, page 238: Le navire s'élève plus haut vers le ciel. (Pourquoi ?)

Challenge 467, page 244: Aucun fil métallique ne permet de construire un câble aussi long. Seule l'idée des nanotubes de carbone a fait ressurgir cet espoir, certains rêvent de voir un matériau de câble fondé sur eux, plus solide que n'importe quel matériau connu jusqu'à présent. Néanmoins, on ne connaît pas encore de matériau ayant cette propriété. Ce système s'expose à de nombreux dangers, tels que les défauts de fabrication, les éclairs, les tempêtes, les météorites et les débris spatiaux. Ils conduiraient tous à la rupture des câbles – si de tels câbles pouvaient exister. Mais le risque le plus important serait le manque de financement pour les construire.

Challenge 438, page 238: La pompe fonctionne en succion, mais la pression de l'air autorise une différence de hauteur de 10 m seulement pour de tels systèmes.

Challenge 439, page 238: Cet argument est compréhensible uniquement lorsque nous nous rappelons que « le double de la quantité » signifie « deux fois plus de molécules ».

Challenge 440, page 239: L'alcool est congelé et le chocolat est placé autour de lui.

Challenge 441, page 239: L'auteur avait suggéré dans une édition plus ancienne qu'une machine pourrait être fondée sur des dispositifs tels que ceux qui lancent les pigeons d'argile utilisés dans les disciplines sportives de tir et de ball trap. Depuis, Lydéric Bocquet et Christophe Clanet ont construit une telle machine, mais en utilisant une conception différente, un schéma peut être consulté sur le site Web lpmcn.univ-lyon1.fr/%7Elbocquet.

Challenge 442, page 239: La troisième composante de l'*air* est l'argon, un gaz noble, qui en constitue environ 1 %. Le reste est composé de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau et d'autres gaz. Ces pourcentages sont-ils des pourcentages en volume ou en poids ?

Challenge ??, page **??**: La plèvre située entre les poumons et le thorax est constamment en dessous de la pression atmosphérique. Un trou dans celle-ci, formé par exemple par une balle de fusil, une épée ou lors d'un accident, conduit à un affaissement des poumons – ce que l'on dénomme le *pneumothorax* – et provoque souvent la mort. Des opérations à poitrine ouverte sur des patients sont devenues possibles, seulement depuis que le chirurgien Ferdinand Sauerbruch comprit en 1904 comment faire face à ce problème. De nos jours, les chirurgiens maintiennent les poumons sous une pression inférieure à la pression atmosphérique jusqu'à ce que tout soit refermé.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 443, page 240: Elle tire profit de la pression d'air engendrée par l'eau qui s'écoule vers le bas.

Challenge 444, page 240: Oui. L'ampoule ne résistera pas à deux véhicules identiques, cependant.

Challenge ??, page **??**: Le radon est environ 8 fois plus lourd que l'air, c'est le gaz le plus dense qui soit connu. En comparaison, $Ni(CO)$ est 6 fois plus lourd que l'air, $SiCl_4$ 4 fois. La vapeur de mercure (qui est évidemment aussi un gaz) est 7 fois plus lourde que l'air. En comparaison, la vapeur de brome est 5,5 fois plus lourde que l'air.

Challenge 447, page 240: Aucune.

Challenge 448, page 240: Il passa les cordes dans la cabine en les faisant traverser du mercure liquide.

Challenge 449, page 240: La pression détruit les poumons.

Challenge ??, page **??**: Il n'existe aucune solution officielle concernant ces questions. Contrôlez simplement vos hypothèses et vos calculs, soigneusement. Internet regorge d'estimations de ce type.

Challenge 452, page 241: La pression sanguine dans les pieds d'un homme debout est d'environ 27 kPa, le double de la pression au niveau du cœur.

Challenge 453, page 241: Le calcul donne $N = J/j = 0{,}0001\,\mathrm{m^3/s}/(7\,\mu\mathrm{m}^2\ 0{,}0005\,\mathrm{m/s})$, ou environ $6 \cdot 10^9$. En réalité, ce nombre est beaucoup plus important, puisque la plupart des capillaires sont fermés à un instant donné. Le rougissement du visage montre ce qui se passe lorsque tous les petits vaisseaux sanguins sont ouverts en même temps.

Challenge 454, page 241: Le savon s'écoule vers le bas de la bulle, la rendant plus épaisse à sa base et plus fine à son sommet, jusqu'à ce qu'elle éclate.

Challenge 469, page 244: Un tremblement de terre d'amplitude moyenne serait engendré.

Challenge 470, page 245: Une stalactite contient un mince canal le long de son axe, à travers duquel l'eau s'écoule, tandis qu'une stalagmite est entièrement pleine.

Challenge 471, page 245: Environ une partie pour mille.

Challenge 456, page 241: Pour que ceci puisse se produire, il faudrait que le frottement puisse exister à l'échelle microscopique et que l'énergie puisse disparaître.

Challenge 457, page 241: L'entonnoir le plus long se vide avant celui qui est plus court. (Si vous ne croyez pas en cela, essayez-le.) Dans le cas où la quantité d'eau qui se trouve dans le tube de l'entonnoir peut être négligée, nous pouvons utiliser la conservation de l'énergie pour le mouvement fluide. Cela fait apparaître la célèbre équation de Bernoulli $p/\rho + gh + v^2/2 = \text{const}$, où p représente la pression, ρ la densité de l'eau et g vaut $9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$. Par conséquent, la vitesse v est supérieure pour des longueurs h plus grandes du tube de l'entonnoir : l'entonnoir le plus long se vide le premier.

Mais cela est étonnant : la formule donne une simple relation de chute libre, puisque la pression de l'*air* est la même au-dessus et en dessous et s'annule dans le calcul. L'expression de la vitesse est donc indépendante du fait qu'un tube soit présent ou non. La véritable explication pour le vidage plus prompt de ce tube est donc que sa présence oblige qu'il y ait plus d'eau qui s'écoule qu'en son absence. Sans tube, le diamètre de l'écoulement d'eau *diminue* pendant la chute. Avec un tube, il demeure *constant*. Cette différence conduit à une évacuation plus rapide.

D'autre part, vous pouvez porter votre attention sur la valeur de la pression de l'*eau* à *l'intérieur* de l'entonnoir. Vous découvrirez que la pression de l'eau est inférieure au début du tube d'évacuation. Cette pression interne de l'eau est plus basse pour des tubes plus longs et aspire l'eau plus rapidement dans ces situations.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 458, page 242: Les yeux des poissons sont positionnés de telle manière que la diminution de pression due à l'écoulement soit compensée par l'augmentation de pression de leur emplacement. Par ailleurs, le cœur est positionné de telle manière qu'il profite de la pression moindre.

Challenge 460, page 242: Le verre se fracasse, le verre est élastique, le verre témoigne de la présence d'ondes sonores transversales, le verre ne s'écoule pas (contrairement à ce que de nombreux ouvrages profèrent), pas même à l'échelle séculaire, les molécules du verre sont figées dans l'espace, le verre est cristallin aux distances faibles, une vitre en verre soutenue à ses extrémités ne se courbe pas en son milieu.

Challenge 461, page 242: Cette prouesse a été accomplie pour des montagnes plus petites, tel que le Mont Blanc dans les Alpes. Aujourd'hui toutefois, il n'existe aucune manière de planer en toute sécurité aux altitudes culminantes des montagnes de l'Himalaya.

Challenge 463, page 242: Pressez le mouchoir dans le fond du verre, et abaissez celui-ci dans l'eau en présentant d'abord son ouverture, tout en maintenant cette ouverture horizontale. Cette méthode est également employée pour faire descendre des individus sous la mer.

Challenge ??, page **??**: Si vous soufflez dans une bouteille contenant une balle en papier, celle-ci volera vers vous. Le fait de souffler dans un entonnoir laissera irrémédiablement la balle de ping-pong à sa place, et plus vous soufflez fort plus elle se maintient. Le fait de souffler à travers un entonnoir en direction d'une chandelle fera incliner sa flamme dans votre direction.

Challenge 472, page 245: Bien que le noyau en fer de la Terre se soit formé de la manière décrite, en collectant le fer issu des astéroïdes qui se sont écrasés puis qui ont sombré vers le centre de la Terre, ce processus ne fonctionnera pas aujourd'hui : dans sa jeunesse, la Terre était beaucoup plus liquide que de nos jours. Il est fort probable que le fer ne coulera pas. De plus, nous ne connaissons aucun procédé permettant de concevoir la sonde de mesure qui pourrait envoyer des ondes sonores assez puissantes pour cette entreprise. La résistance due à la température est également un problème, mais il pourrait être levé.

Challenge 474, page 247: Les atomes ne sont pas infiniment durs, comme le montre la théorie
Page ?? quantique. Ils sont davantage assimilables à des nuages déformables.

Challenge 476, page 253: Dans 5 milliards d'années, la situation actuelle cessera, et le Soleil deviendra une géante rouge. Mais après cela, il continuera de brûler pendant une période encore plus longue.

Challenge 480, page 257: Nous découvrirons plus tard que l'Univers n'est pas un système phy-
Page ?? sique, donc le concept d'entropie ne peut s'y appliquer. Ainsi l'Univers n'est ni isolé ni fermé.

Challenge 483, page 258: La réponse dépend de la taille des ballons, puisque la pression n'est pas une fonction monotone de la taille. Si le ballon le plus petit n'est pas trop petit, celui-ci gagne.

Challenge 485, page 259: Mesurez l'aire de contact entre les pneus et la route (pour tous les quatre) et multipliez alors par 200 kPa, la pression habituelle d'un pneu. Vous obtenez le poids du véhicule.

Challenge 489, page 261: Si la moyenne du carré du déplacement est proportionnelle au temps, la matière est constituée de particules élémentaires. Ceci fut confirmé par les expériences de Jean Perrin. L'étape suivante consiste à déduire le nombre de ces particules à partir de la constante de proportionnalité. Cette constante, définie par $\langle d^2 \rangle = 4Dt$, est appelée la constante de diffusion (le facteur 4 est valide pour un mouvement aléatoire en deux dimensions). Cette constante de diffusion peut être déterminée en observant le mouvement d'une particule au microscope.

Étudions une particule brownienne de rayon a. En deux dimensions, son déplacement au carré est donné par

$$\langle d^2 \rangle \frac{4kT}{\mu} t \,, \tag{131}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

où k représente la constante de Boltzmann et T la température. Cette relation se retrouve en analysant le mouvement d'une particule ayant une force de traînée $-\mu v$ et qui est soumise à des collisions aléatoires. Le coefficient de traînée linéaire μ d'une sphère de rayon a est donné par

$$\mu = 6\pi\eta a \,. \tag{132}$$

Autrement dit, nous avons

$$k = \frac{6\pi\eta a}{4T}\frac{\langle d^2\rangle}{t} \,. \tag{133}$$

Toutes les quantités situées à droite peuvent être mesurées, permettant ainsi de déterminer la constante de Boltzmann k. Puisque la relation du gaz parfait montre que la constante du gaz parfait R est reliée à la constante de Boltzmann par $R = N_A k$, le nombre d'Avogadro N_A, qui donne le nombre de molécules dans une mole, est également déterminé de cette manière.

Challenge 496, page 268: Oui, cet effet est facilement perceptible.

Challenge 498, page 269: L'air chaud est moins dense et cherche donc à s'élever.

Challenge 499, page 269: Gardez le papier toujours humide.

Challenge 501, page 269: L'air doit être déshumidifié.

Challenge 502, page 269: De manière générale, il est impossible de dessiner une droite passant par trois points. Puisque le zéro absolu et le point triple de l'eau ont leurs grandeurs fixées, on peut parier qu'à coup sûr le point d'ébullition ne vaudra pas précisément 100 °C.

Challenge 503, page 269: Non, car une molécule d'eau est plus lourde que cette marge. Cependant, si l'on considère de l'eau contenant des impuretés, c'est possible. Qu'advient-il si le quantum d'action est pris en considération ?

Challenge 504, page 270: Le danger ne provient pas de la quantité d'énergie, mais est dû à la durée à laquelle elle devient disponible.

Challenge 505, page 270: Il y a plein de solutions sur Internet.

Challenge 507, page 271: Uniquement si c'est un système isolé. L'Univers est-il un système fermé ? Est-ce un système ? Nous discuterons de cela dans l'ultime partie de l'ascension montagneuse.

Challenge 510, page 271: Pour des animaux si petits la température corporelle deviendrait trop faible. Ils ne pourraient pas s'alimenter suffisamment rapidement pour obtenir l'énergie nécessaire afin de se réchauffer.

Challenge 519, page 272: Elle est d'environ 10^{-9} fois celle de la Terre.

Challenge 521, page 273: L'épaisseur des sillons dans le cerveau, les bulles dans les poumons, la densité des vaisseaux sanguins et la taille des cellules biologiques.

Challenge 522, page 273: La vapeur de mercure qui surplombe le liquide devient saturée.

Challenge 523, page 273: Un projet dédié de la NASA a étudié cette question. La Figure 163 donne un exemple de comparaison. Vous pouvez trouver plus de détails sur leur site Web.

Challenge 524, page 273: Les dangers sont dus aux orages et les risques financiers sont trop importants.

Challenge 525, page 274: Le tourbillon à l'intérieur du tube est froid près de son axe et chaud dans les régions éloignées de l'axe. Par le truchement de la membrane située au milieu du tube (indiquée dans la Figure 139 à la page 273) l'air issu de la région proche de l'axe est envoyé à une extrémité et l'air provenant de la région extérieure, à l'autre extrémité. Le réchauffement de la zone extérieure provient du travail que l'air qui tourne à l'intérieur a dû effectuer sur l'air extérieur pour obtenir une rotation qui consomme du moment cinétique. Pour une explication

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

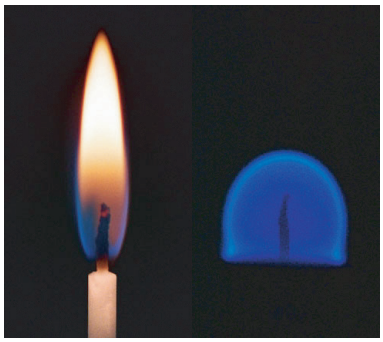


FIGURE 163 Une bougie sur Terre et une en microgravité. (NASA)

détaillée, compulsez le magnifique livre de MARK P. SILVERMAN, *And Yet it Moves : Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press, 1993, p. 221.

Challenge 526, page 274: Le blanc d'œuf durcit à 70 °C, le jaune d'œuf de 65 à 68 °C. Cuisinez un œuf à cette dernière température, et l'exploit devient possible.

Challenge ??, page **??**: Dans le cas de l'eau, après avoir effectué plusieurs tours, l'encre est mélangée, et le fait de tourner en sens inverse accroît le mélange. Dans le cas de la glycérine, le fait d'effectuer quelques tours *semble* mélanger l'encre, et le fait de tourner en sens inverse annule ce mélange.

Challenge ??, page **??**: Les températures négatives représentent un artifice conceptuel définissable uniquement pour les systèmes ayant quelques états discrets. Ce ne sont pas de véritables températures, parce qu'elles ne décrivent pas des états d'équilibre, et en réalité ne s'appliquent jamais aux systèmes constitués d'un continuum d'états.

Challenge 530, page 275: Cela est également vrai pour la forme des corps humains, le contrôle par le cerveau du mouvement de l'homme, la croissance des fleurs, les vagues de la mer, la formation des nuages, les processus sous-jacents aux éruptions volcaniques, etc.

Challenge 535, page 280: Il y a beaucoup plus de papillons que de tornades. De surcroît, la croyance dans l'effet papillon masque totalement un aspect de la nature qui est essentiel pour l'auto-organisation : le frottement et la dissipation. L'effet papillon, en faisant la supposition qu'il puisse exister, exige que la dissipation soit négligée. Il n'existe aucun fondement expérimental pour cet effet, puisqu'il n'a jamais été observé.

Challenge 545, page 286: Ces trois déclarations sont toutes des balivernes. Un coefficient de traînée implique que la surface d'exposition de la voiture soit connue avec la même précision. C'est réellement extrêmement difficile à mesurer et à maintenir à une valeur constante. En fait, la valeur de 0,375 pour la Ford Escort était une absurdité, comme l'ont montré de nombreuses autres mesures. La consommation de carburant est encore plus ridicule, puisqu'elle implique que les volumes de carburant et les distances peuvent être mesurés avec la même précision. Les sondages sont collectés en téléphonant à 2 000 personnes au maximum, à cause des difficultés pour sélectionner le bon échantillon représentatif, cela donne une précision de 3 % au plus.

Challenge 546, page 286: Non. La nature ne permet pas d'avoir plus de 20 chiffres de précision environ, comme nous le découvrirons plus tard dans notre promenade. Ce n'est pas suffisant pour un livre ordinaire. La question de savoir si un tel nombre peut représenter une partie de son propre livre disparaît donc.

Challenge 548, page 288: Chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, chaque comparaison requiert de la lumière ou un certain autre champ électromagnétique. Cela est également vrai pour les mesures de durées.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 549, page 288: Chaque mesure de masse est une comparaison avec un étalon standard, chaque comparaison requiert de la lumière ou un certain autre champ électromagnétique.

Challenge 550, page 288: Les mesures angulaires ont les mêmes propriétés que les mesures de longueur ou de durée.

Challenge 554, page 305: Les limites de Planck peuvent être dépassées pour des observables étendues pour lesquelles des systèmes à nombreuses particules peuvent dépasser les limites d'une particule unique, comme la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ou la résistance électrique.

Challenge 558, page 310: N'oubliez pas la dilatation relativiste du temps.

Challenge 559, page 310: Environ 10 µg.

Challenge 560, page 310: Puisque la température du point triple de l'eau est fixée, la température du point d'ébullition est également figée. Historiquement, la valeur du point triple n'a pas été convenablement choisie.

Challenge 561, page 311: Il est probable que la quantité ayant la plus grande variation soit la masse, où un préfixe pour $1\,\mathrm{eV}/c^2$ serait utile, de même que pour la masse totale présente dans l'Univers, qui est environ 10^{90} fois plus grande.

Challenge 562, page 312: La formule avec $n-1$ est un choix plus convenable. Pourquoi ?

Challenge 565, page 315: Non, seulement les propriétés des parties de l'Univers. L'Univers lui-même ne possède aucune propriété, comme indiqué à la page **??**.

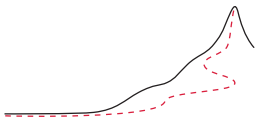
Challenge 566, page 317: Ce ralentissement progresse en *proportion quadratique* avec le temps, parce que chaque nouveau ralentissement s'ajoute au précédent !

Challenge 567, page 319: Le double de ce nombre, le nombre constitué de la suite de tous les nombres pairs, etc.

Challenge 570, page 352: Cela pourrait être résolu avec une astuce similaire à celle utilisée pour l'irrationalité de chacun des deux termes de la somme, mais personne n'en a décelée une.

Challenge 571, page 352: Il y a toujours de nombreuses découvertes qui attendent d'être révélées en mathématiques modernes, particulièrement en topologie, en théorie des nombres et en géométrie algébrique. Les mathématiques ont un avenir radieux.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



CRÉDITS

Remerciements

Nombreux sont ceux qui ont su entretenir leur don de curiosité et qui ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Saverio Pascazio a été – présent ou non – une référence constante pour ce projet. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller et, avant toutes choses, ma femme Britta ont tous apporté de précieux conseils et encouragements.

De nombreuses personnes ont aidé ce projet grâce à leurs précieuses informations. Parmi les plus pertinentes, il y a celles de Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, les innombrables améliorations apportées par Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farinati, les nombreuses améliorations d'Eric Sheldon, les avis développés d'Andrew Young, l'aide persévérante et les conseils de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide considérable, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des renseignements importants ont été fournis par Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier, Peter Brown, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Sergei Kopeikin, et de nombreuses autres personnes qui souhaitent rester dans l'anonymat.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et Achim Blumensath sur les polices et la mise en page, et avec l'assistance répétée et précieuse de Donald Arseneau. L'aide provient également de Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

Toutes les illustrations et animations dans ce texte ont été mises à disposition par leurs détenteurs des droits d'auteurs. Je les remercie tous chaleureusement. Ils sont cités dans les sections des crédits photographiques et filmographiques. Plus particulièrement, Lucas Barbosa et José Antonio Díaz Navas ont produit des animations spécialement pour ce livre, et Luca Gastaldi, Antonio Martos et Ulrich Kolberg ont composé des images spécifiquement pour celui-ci. La mise en page et le design de ce livre sont dus à la consultation professionnelle de Ulrich Dirr. Les suggestions et l'assistance de ma femme Britta comptent également pour beaucoup dans le design de l'ouvrage et de son site Web.

Depuis Mai 2007, la Klaus Tschira Foundation supporte généreusement l'édition et la publication électronique du livre *Motion Mountain*.

Crédits filmographiques

L'animation claire d'une toupie suspendue, indiquée à la page **??**, fut réalisée pour cet ouvrage par Lucas V. Barbosa. La ravissante animation de la lunaison à la page 130 fut calculée à partir de données astronomiques récentes, est protégée par les droits d'auteur et est aimablement fournie par Martin Elsässer. Elle peut être retrouvée sur son site Web www.mondatlas.de/lunation.html. Les films des solitons à la page 219 et ceux des dromions à la page 226 sont protégés par les droits d'auteur et sont gracieusement fournis par Jarmo Hietarinta. Ils peuvent être consultés sur son site Web users.utu.fi/hietarin. La vidéo des anneaux tourbillonnants qui s'enchevêtrent à la page 243 est protégée par les droits d'auteur et est aimablement fournie par Lim Tee Tai. Elle peut être retrouvée via son site Web sur la dynamique des fluides serve.me.nus.edu.sg. Le film de la croissance d'un flocon de neige à la page 278 est la propriété de Kenneth Libbrecht, qui l'accorde aimablement. Il peut être consulté sur son site Web www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals.

Crédits photographiques

La photographie de la montagne en couverture est aimablement fournie et est protégée par les droits d'auteur de Dave Thompson (www.daveontrek.co.uk). La photographie de l'éclair à la page 13 est la courtoisie de Harald Edens qui en détient les droits d'auteur, et peut être retrouvée sur les sites Web www.lightningsafety.noaa.gov/photos.htm et www.weather-photography.com. L'illusion du mouvement à la page **??** est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Michael Bach, on la retrouve sur son site Web www.michaelbach.de/ot/mot_rotsnake/index.html. C'est une variante de l'illusion de Kitaoka Akiyoshi que l'on trouve sur www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka et utilisée ici avec sa permission. Les figures des pages 17, 46 et 142 ont été réalisées spécialement pour cet ouvrage et sont la propriété de Luca Gastaldi. Les photographies à haute résolution temporelle du rebond d'une balle de tennis à la page **??** sont la propriété de la Fédération Internationale de Tennis, et ont été aimablement fournies par Janet Page. Les représentations de l'Etna aux pages **??** et 137 sont protégées par les droits d'auteur et aimablement accordées par Marco Fulle, elles sont tirées du magnifique site Web www.stromboli.net. La célèbre photographie de la pointe des Poulains et de son phare de Philip Plisson à la page 21 est aimablement fournie et protégée par les droits d'auteur par Pêcheurs d'Images, consultez les sites Web www.plisson.com et www.pecheurs-d-images.com. On la trouve également dans le *Magnum opus* de Plisson *La Mer*, un livre renversant sur les photographies de la mer. L'image à la page **??** d'Alexander Tsukanov qui saute d'une roue ultime (un monocycle sans selle et sans fourche [N.D.T.]) à une

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

autre est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par le Cirque de Moscou. La photographie d'une gazelle à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement accordée par Tony Rodgers, elle est tirée de son site Web www.flickr.com/photos/moonm. Le graphique de la page ?? a été redessiné et traduit du merveilleux livre de HENK TENNEKES, *De wetten van de vliegkunst - Over stijgen, dalen, vliegen en zweven*, Aramith Uitgevers, 1993. Les photographies de la balle de ping-pong à la page 34, du robinet qui fuit à la page 236 et du tournesol à la page ?? sont protégées par les droits d'auteur et aimablement accordées par Andrew Davidhazy et sont retrouvées sur son site Web www.rit.edu/~andpph. La photographie du cadran solaire de précision à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Stefan Pietrzik, on la trouve sur commons.wikimedia.org/wiki/Image:Präzissions-Sonnenuhr_mit_Sommerwalze.jpg. Le graphique sur l'échelle des rythmes biologiques à la page ?? est aimablement fourni et appartient à Enrique Morgado. Les illustrations du pied à coulisse à vernier et de la vis micrométrique aux pages ?? et 54 sont protégées par les droits d'auteur de Medien Werkstatt, aimablement accordées par Stephan Bogusch, et sont tirées de leurs cours d'enseignement situés sur leur site Web www.medien-werkstatt.de. La photo du tigre à la page ?? est la propriété du zoo de Naples (en Floride, pas en Italie), et est aimablement fournie par Tim Tetzlaff, visitez leur site Web sur www.napleszoo.com. Les autres instruments de mesure de longueur à la page ?? sont la propriété de Keyence et Leica Geosystems, et aimablement fournis par eux, que l'on retrouve sur www.leica-geosystems.com. La photographie du cristal de gauche à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Stephan Wolfsried, on la trouve sur le site Web www.mindat.org. La photographie du cristal de droite à la page ?? est aimablement fournie par Tullio Bernabei, sous la protection des droits d'auteur de Arch. Speleoresearch & Films/La Venta, et on la trouve sur les sites Web www.laventa.it et www.naica.com.mx. La figure de la Terre creuse aux pages 49 et 264 sont aimablement fournies par Helmut Diel et furent dessinées par Isolde Diel. Les photographies de la Lune aux pages 54 et ??, ainsi que les analemmes à la page 147 et à la page 378, sont la propriété et aimablement accordées par Anthony Ayiomamitis, le récit de ces photographies est conté sur son merveilleux site Web www.perseus.gr. La photographie anticrépusculaire à la page 55 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Peggy Peterson. La figure de la chenille catapulte, à la page 59 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Stanley Caveney. La photographie d'un capteur d'airbag à la page ?? est la propriété et aimablement accordée par Bosch ; l'image de l'accéléromètre est la propriété et aimablement accordée par Rieker Electronics ; les trois dessins de l'oreille humaine sont la propriété de l'université du Northwestern et sont aimablement fournis par Tim Hain, on les retrouve sur son site Web www.dizziness-and-balance.com/disorders/bppv/otoliths.html. La photographie d'Orion à la page 65 est la propriété et aimablement accordée par Matthew Spinelli. La photographie de *N. decemspinosa* à la page 68 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Robert Full, on la trouve sur son site Web rjf9.biol.berkeley.edu/twiki/bin/view/PolyPEDAL/LabPhotographs. La photographie de *P. ruralis* à la page 68 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par John Brackenbury, et fait partie de sa magnifique collection sur le site Web www.sciencephoto.co.uk. La photographie du mille-pattes à la page 68 est la propriété et aimablement accordée par David Parks, on la trouve sur son site Web www.mobot.org/mobot/madagascar/image.asp?relation=A71. La photographie du gecko qui grimpe sur la fenêtre du bus à la page 68 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Marcel Berendsen, on la retrouve sur sa page Web www.flickr.com/photos/berendm. La photographie de la comète McNaught à la page ?? est la propriété et aimablement accordée par son découvreur Robert McNaught, elle est tirée de son site Web www.mso.anu.edu.au/~rmn mais on la trouve aussi sur antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap070122.html. La photographie du kilogramme étalon à la page 72 est la propriété et aimablement fournie par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). La photographie de la balance de Mendeleïev à la page ?? est la propriété de Thinktank Trust et aimablement

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

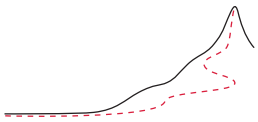
fournie par Jack Kirby, elle peut être retrouvée sur le site Web www.birminghamstories.co.uk. La photographie de la balance de laboratoire à la page ?? est sous la protection des droits d'auteur et aimablement fournie par Mettler-Toledo. Le graphique de la décomposition de la marche humaine à la page 92 est protégé par les droits d'auteur et aimablement accordé par Ray McCoy. La photographie du gyroscope de Foucault à la page 97 est aimablement fournie et est la propriété du musée du CNAM, le Conservatoire National des Arts et Métiers à Paris, dont le site Web est www.arts-et-metiers.net. La photographie du gyroscope laser à la page 97 est aimablement fournie et est la propriété du JAXA, le Japan Aerospace Exploration Agency, on la retrouve sur leur site Web jda.jaxa.jp. Le dessin du gyroscope laser de haute précision à la page ?? est aimablement fourni et est la propriété du Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. La photographie de l'instrument est aimablement fournie et est la propriété de Carl Zeiss. Cette machine est située au Fundamentalstation Wettzell, et l'adresse de son site Web est www.wettzell.ifag.de. L'image sur la sonoluminescence à la page 111 est gracieusement fournie par Detlev Lohse qui en détient les droits d'auteur. La Figure 67 à la page 116 est aimablement fournie et est la propriété du projet international Gemini (Gemini Observatory/Association d'Universités pour la Recherche en Astronomie) sur www.ausgo.unsw.edu.au et www.gemini.edu. La photographie de l'horloge qui n'a pas besoin d'être remontée, à la page ??, est sous la protection des droits d'auteur de Jaeger-LeCoultre et aimablement fournie par Ralph Stieber. Son fonctionnement et son histoire sont décrits en détail dans la brochure disponible chez cette compagnie. Son site Web est www.Jaeger-LeCoultre.com. Le basilic qui court sur l'eau, à la page 117 et en dernière de couverture, est aimablement fourni et est la propriété du groupe belge TERRA vzw, on le retrouve sur leur site Web www.terra.vzw.org. La photographie de l'araignée d'eau à la page 118 est gracieusement fournie et est la propriété de Charles Lewallen. La photographie du robot sur l'eau à la page 118 est gracieusement fournie et est la propriété de l'American Institute of Physics. La photographie de l'horloge à pendule de haute précision à la page ?? est sous la protection des droits d'auteur de Erwin Sattler OHG, et aimablement fournie par Mme Stéphanie Sattler-Rick, on peut la trouver sur le site Web www.erwinsattler.de. La figure de la triangulation du méridien de Paris à la page 124 est la propriété et est aimblement fournie par Ken Alder, on la trouve sur son site Web www.kenalder.com. Le géoïde de la page 127 est aimablement fourni et est la propriété de GFZ Potsdam, que l'on retrouve sur www.gfz-potsdam.de. La photographie des satellites de Galilée à la page ?? est aimable fournie et est la propriété de Robin Scagell, elle est tirée de son site Web www.galaxypix.com. Les cartes lunaires à la page 131 sont aimablement fournies par l'USGS Astrogeology Research Program, astrogeology.usgs.gov, en particulier Mark Rosek et Trent Hare. Les photographies de la marée à la page ?? sont protégées par les droits d'auteur et sont aimablement fournies par Gilles Régnier, on les retrouve sur son site Web www.gillesregnier.com ; celui-ci montre également une animation de cette marée pendant toute une journée. Les images des descentes rapides sur la neige à la page ?? sont la propriété et sont aimablement accordées par Simone Origone, www.simoneorigone.it, et par Éric Barone, www.ericbarone.com. Les images des éclipses solaires à la page 153 sont aimablement fournies et sont la propriété du Centre National d'Études Spatiales, sur www.cnes.fr, et de Laurent Laveder, d'après son magnifique site www.PixHeaven.net. Les images des marguerites à la page 171 sont protégées et sont aimablement fournies par Giorgio Di Iorio, que l'on trouve sur son site Web www.flickr.com/photos/gioischia, et Thomas Luethi, que l'on trouve sur son site Web www.tiptom.ch/album/blumen/. La photographie des feux d'artifices à Chantilly à la page ?? est aimblement fournie, est protégée par Christophe Blanc et est tirée de son magnifique site Web sur christopheblanc.free.fr. La figure des myosotis à la page 190 est aimablement fournie et est la propriété de Markku Savela. Les figures d'interférences à la page ?? sont la propriété et sont aimablement fournies par Rüdiger Paschotta, on les retrouve sur son encyclopédie libre sur les lasers sur www.rp-photonics.com. L'image du soliton dans le canal à la page 218 est la propriété et est aimablement fournie par Dugald Duncan, elle est tirée de sa page Web www.ma.hw.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ac.uk/solitons/soliton1.html. La montagne fractale à la page 228 est aimablement fournie et est la propriété de Paul Martz, qui explique sur son site Web www.gameprogrammer.com/fractal.html comment programmer de telles images. Les photographies du carbure de silicium à la page ?? sont la propriété et aimablement fournies par Dietmar Siche. La photographie d'un MFA à la page 234 est la propriété de Nanosurf (allez sur www.nanosurf.ch) et est utilisée avec l'aimable permission de Robert Sum. L'image au MFA du silicium à la page 234 est la propriété de l'Universität Augsburg et est reproduite avec l'aimable autorisation de German Hammerl. La figure des atomes d'hélium sur du métal à la page 234 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par IBM. La photographie d'un unique ion baryum à la page ?? est sous la protection des droits d'auteur et aimablement fournie par Werner Neuhauser de l'Universität Hamburg. Les photographies du mouvement fluide à la page 236 sont protégées et aimablement accordées par John Bush, Massachusetts Institute of Technology, et sont tirées de sa page Web www-math.mit.edu/~bush. La photographie de l'anneau de fumée sur l'Etna à la page ?? est aimablement fournie et est la propriété de Daniela Szczepanski, on la retrouve sur ses grands sites Web www.vulkanarchiv.de et www.vulkane.net. La photographie de l'Atomium à la page 247 est aimablement fournie, est la propriété de l'Asbl Atomium Vzw et est reproduite ici avec leur permission, en coopération avec la SABAM en Belgique. L'image et l'Atomium lui-même sont tous les deux sous la protection des droits d'auteur. Les photographies du jet granulaire dans le sable à la page 276 sont la propriété et sont aimablement fournies par Amy Shen, qui découvrit ce phénomène avec Sigurdur Thoroddsen. La photographie de l'excavatrice à roue à godets à la page ?? est la propriété et est aimablement fournie par RWE et peut être retrouvée sur leur site Web www.rwe.com. Les images thermographiques d'un vélo qui freine à la page 251 sont la propriété de Klaus-Peter Möllmann et Michael Vollmer, Fachhochschule Brandenburg/Allemagne, et sont aimablement fournies par Michael Vollmer et Frank Pinno. La photographie de la montgolfière à la page ?? est la propriété de Johan de Jong et est aimablement fournie par le Dutch Balloon Register que l'on retrouve sur www.dutchballoonregister.nl. L'image de l'or au microscope à effet tunnel à la page 266 est aimablement fournie par Sylvie Rousset et est la propriété du CNRS. Les photographies et la figure à la page ?? sont protégées et aimablement accordées par Ernesto Altshuler, Claro Noda et leurs collègues, on les retrouve sur leur site Web www.complexperiments.net. La photo des plissements sur la route à la page ?? est gracieusement accordée par David Mays et est tirée de son article ?. L'image des ondes solitaires à la page 277 est aimablement fournie et est protégée par Paul Umbanhowar. Le dessin des sphères qui tournent à la page 277 est gracieusement fourni et est la propriété de Karsten Kötter. La photo du fluide qui s'écoule sur un plateau incliné à la page 282 est aimablement fournie et est la propriété de Vakhtang Putkaradze. Les photographies des colonnes rigides à la page ?? sont protégées par les droits d'auteur de Gerhard Müller (1940–2002), et sont mises à disposition par Ingrid Hörnchen. La photographie des rayons de soleil à la page 357 est protégée et aimablement fournie par Fritz Bieri et Heinz Rieder, on la trouve sur leur site Web www.beatenbergbilder.ch. Le dessin à la page 360 est gracieusement fourni et est la propriété de Daniel Hawkins. La photographie d'une règle à calcul à la page 364 est aimablement fournie et est la propriété de Jörn Lütjens, on la retrouve sur son site Web www.joernluetjens.de. La photographie de la bulle de savon qui éclate, à la page 354, est protégée par les droits d'auteur, est aimablement fournie par Peter Wienerroither et on la retrouve sur sa page Web homepage.univie.ac.at/Peter.Wienerroither. Les portraits historiques des physiciens dans ce texte ne sont pas protégés par des droits d'auteur, sauf lorsque c'est mentionné. Tous les dessins qui ne sont pas explicitement cités sont sous la protection des droits d'auteur © 1997 – 2010 Christoph Schiller. Si vous soupçonnez qu'un droit d'auteur est attribué ou obtenu de manière incorrecte, cela n'est pas intentionnel et vous êtes aimablement invités à en faire part à l'auteur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



INDEX DES NOMS

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où la personne est présentée plus en détail.

A
Abe, F. 332
Ackermann, Peter 350
Ackermann, Rudolph 361
Adelberger, E.G. 338
Adenauer, Konrad 142
Aetius 71, 334
Ahlgren, A. 331
Ahrens, C. Donald 340
Aigler, M. 46
Åkerman, N. 340
Alder, Ken 338, 394
Alighieri, Dante 120
Alsdorf, D. 340
Altshuler, Ernesto 395
Amundsen, Roald 120, 337
An, K. 344
Anders, S. 338
Anderson, R. 335
Andreotti, B. 347
Aniçin, I.V. 338
Arch. Speleoresearch & Films/La Venta 393
Archimède 72
Aristarchos 334
Aristarque de Samos 94, 102, 334
Aristote 32, 38, 122, 332
Armstrong, J.T. 333
Aronson, Jeff 391
Aronson, Jeff K. 350
Arseneau, Donald 391
Ashby, M.F. 343
Astérix 244
Ata Masafumi 391
Atomium - SABAM 395
Atomium – SABAM 247
Audoin, C. 350
Augel, Barbara et Edgar 391
Ausloos, M. 343
Avogadro, Amadeo 233
Axelrod, R. 328
Ayiomamitis, Anthony 378, 393

B
Babinet, Jacques *301*
Babloyantz, A. 347
Bach, Michael 392
Baez, John 391
Bagnoli, Franco 391
Banach, Stefan *45*, 46, 228
Banavar, J.R. 342
Bandler, R. 328
Bandler, Richard 168, 328
Baptista van Helmont, Johan 258
Barber, B.P. 337
Barberi Gnecco, Bruno 391
Barbosa, Lucas 392
Barbosa, Lucas V. 392
Barbour, John 331
Barone, Éric 394
Bartel, Elmar 391
Battista Guglielmini, Giovanni 94
Batty, R.S. 343
Baudelaire, Charles *17*
Bautista, Ferdinand 391
Beaty, William 391
Becker, J. 340
Beeksma, Herman 391
Behroozi, C.H. 330
Bekenstein, Jakob 274
Belfort, François 391
Belic, D. 350
Benka, S. 334
Bennet, C.L. 336
Bentley, W.A. 347
Berendsen, Marcel 393
Bergquist, J. 350
Bernabei, Tullio 393
Bernoulli, Daniel *258*
Bernoulli, J. 296
Bessel 101
Bevis, M. 340
Beyer, Lothar 391
Bielefeldt, H. 344
Bieri, Fritz 357, 395
Biggar, Mark 391
Bilger, H.R. 335
Bird, D.J. 350
Bischoff, Bernard 349
Blagden, Charles 269
Blair, D.G. 351
Blanc, Christophe 394
Blumensath, Achim 391
Bocquet, Lydéric 344, 385
Bogusch, Stephan 393
Bohr, Niels 264
Boiti 225
Boiti, M. 343
Boltzmann, Ludwig 179, *260*
Bombelli, Luca 391
Boone, Roggie 391

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

B

BOREL

Borel, Émile 268
Borel, Émile 347
Borelli, G. 329
Bosch 393
Bourbaki, N. 296
Bowden, F.P. 341
Bower, B. 342
Boèce 326
Brackenbury, John 393
Bradley, James *103*, 103
Braginsky, V.B. 339
Brahe, Tycho *120*, 121
Brahm, A. de 295
Brandes, John 391
Brantjes, R. 377
Brebner, Douglas 391
Brennan, Richard 329
Bright, William 349
Brillouin, L. 346
Brillouin, Léon 263
Brooks, Mel 254
Brouwer, Luitzen 40
Brown, J.H. 342
Brown, Peter 391
Brown, Robert 259
Bruce, Tom 391
Brush, S. 336
Buchmann, Alfons 391
Buckley, Michael 328
Budney, Ryan 391
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 394
Bunyan, Paul 343
Buridan, Jean 122, 338
Burša, Milan 332
Busche, Detlev 331
Bush, John 236, 395
Böhncke, Klaus 391

C

Cajori, Florian 349
Calzadilla, A. 341
Campbell, D. 347
Campbell, D.K. 347
Caps, H. 344
Carl Zeiss 394
Carlip, Steve 391
Carlyle, Thomas 106
Carnot, Sadi 84
Carr, Jim 391
Carroll, Lewis, ou Charles Lutwidge Dogson 264
Cartesius 42
Casati, Roberto 333
Cassus Dio 153
Cauchy, Augustin-Louis 193
Cavendish, Henry *125*
Caveney, S. 332
Caveney, Stanley 59, 60, 393
Cayley, Arthur 193
Celsius, Anders 310
Chaineux, J. 349
Chan, M.A. 335
Chandler, Seth 101
Charlemagne 295
Charpak, G. 350
Childs, J.J. 344
Chomsky, Noam 331
Christlieb, N. 338
Christou, A.A. 339
Chudnovsky, D.V. 352
Chudnovsky, G.V. 352
Cirque de Moscou 393
Clancy, Tom 343
Clanet, Christophe 385
Clarke 330
Clausius, Rudolph 254, 260
Clavius, Christophorus 55
Cléobule *42*
CNAM 394
CNRS 266, 395
Codling, K. 350
Cohen-Tannoudji, G. 346
Cohen-Tannoudji, Gilles 264
Colazingari, Elena 391
Coleman–McGhee, Jerdome 344
Colladon, Daniel 240
Collins, J.J. 329
Compton, A.H. 336
Compton, Arthur 98
Conkling, J.A. 57
Conservatoire National des Arts et Métiers 394
Conti, Andrea 391
Cooper, Heather 337
Cooper, J.N. 328
Coriolis, Gustave-Gaspard *81*, 95
Cornell, E.A. 330
Corovic, Dejan 391
Costabel, Pierre 229
Craven, J.D. 340
Crespi, Roberto 391
Crutchfield, J. 347
Crystal, David 348
César, Jules 297

D

d'Aquin, Thomas 328
Dahlman, John 391
Danecek, Petr 391
Daniel Titius, Johann 152
Dante Alighieri 120
Darius, J. 334
Darley, Vincent 392
Darre, Daniel 391
Dasari, R.R. 344
Davidhazy, Andrew 236, 393
Davis, S.D. 343
de Vries 218
Deaver, B.S. 313
Dehmelt, H. 344
Dehmelt, Hans 343
Dehn, Max 46
Demko, T.M. 335
Denis Poisson, Siméon 126
Descartes, R. 296
Descartes, René 42, 363
Destexhe, A. 347
DeTemple, D.W. 352
Deutschmann, Matthias 325
Dewdney, Alexander 56
Dicke, R.H. 339
Diehl, Helmut 49
Diel, Helmut 393
Diel, Isolde 393
Diez, Ulrich 392
DiFilippo, Frank 391
Dill, L.M. 343
Dio, Cassius 340
Dirac, Paul 205, 296
Dirr, Ulrich 392
Dixon, Bernard 332
Di Iorio, Giorgio 394
Dobra, Ciprian 391
Dorbolo, S. 344

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

D

DORBOLO

Dorbolo, Stéphane 243
Dougherty, R. 331
Doyle, Arthur Conan 228
Dragon, Norbert 391
Dubelaar, N. 377
Dubrulle, B. 340
Dumont, Jean-Paul 328, 334, 348
Duncan, Dugald 218, 394
Durieux, M. 345
Dusenbery, David 333
Dutton, Z. 330
Dyson, Freeman 391
Díaz Navas, José Antonio 392
Démocrite 232

E
Eőtvős, Roland von 98
Earman, John 331
Eckhardt, B. 348
Eddington, Arthur 79
Edelmann, H. 338
Edens, Harald 392
Edwards, B.F. 373
Einstein, A. 346
Einstein, Albert 17, 136, 139, 140, 181, 197, 200, 205, 259, 261
Ekman, Walfrid 334
Elert Bode, Johann 152
Els, Danie 392
Elsevier, Louis 356
Elswijk, H.B. 344
Elswijk, Herman B. 391
Elsässer, Martin 130, 392
Emelin, Sergei 391
Emerson, Ralph Waldo 220
Emsley, John 347
Engels, Friedrich 164
Engemann, S. 344
Enquist, B.J. 342
Enss, Christian 345
Erdös, Paul 46
Erwin Sattler OHG 394
Euclide 31
Eukleidês 31
Euler, L. 296
Euler, Leonhard 101, 153, 156, 336
Evans, J. 340
Everitt, C.W. 313

F
Fairbanks, J.D. 313
Faisst, H. 348
Falk, G. 339
Farinati, Claudio 391
Farmer, J. 347
Farrant, Penelope 333
Fatio de Duillier, Nicolas 150
Fayeulle, Serge 340
Fehr, C. 341
Fekete, E. 339
Feld, M.S. 344
Fermani, Antonio 391
Fernandez–Nieves, A. 337
Feynman, Richard P. 327
Fibonacci 294
Figueroa, D. 341
Filippov, T. 342
Fink, Hans-Werner 344
Finkenzeller, Klaus 391
Firpić, D.K. 338
Fischer, Ulrike 391
Flach, S. 347
Flachsel, Erwein 328
Flindt, Rainer 330
Fokas 225
Fokas, A.S. 343
Foreman, M. 331
Forsberg, B. 340
Fortes, L.P. 340
Foster, James 341
Foucault, Jean Bernard Léon 96
Franklin, Benjamin 229
Frasinski, L.J. 350
Fray Richardson, Lewis 44
Frenzel 110
Fresnel, Augustin 214
Friedman, David 156
Friedrich Benzenberg, Johann 95
Fritsch, G. 343
Frova, Andrea 332
Full, Robert 393
Fulle, Marco 392
Fumagalli 225
Fumagalli, Giuseppe 334, 341
Fundamentalstation Wettzell 394
Furrie, Pat 391
Fédération Internationale de Tennis 392

G
Gabriel Stokes, George 237
Galilei, Galileo 30, 37, 54, 57, 58, 84, 94, 124, 141, 144, 145, 229, 230, 232, 356, 367
Galilée 94
Galois, Évariste 193
Gardner, Martin 364
Garrett, A. 334
Garwin, R.L. 350
Gaspard, Pierre 261, 346
Gastaldi, Luca 392
Gauthier, N. 342
Gelb, M. 328
Geng, Tao 188
Georgi, Renate 391
Ghahramani, Z. 341
Ghavimi–Alagha, B. 337
Gibbons, Gary 391
Giessibl, F.J. 344
Gilligan, James 341
Glassey, Olivier 391
Gold, Tommy 213
Goldstein, Herbert 341
Goles, E. 347
Golubitsky, M. 329
González, Antonio 391
Goriely, A. 344
Gottlieb Leidenfrost, Johann 241
Gracovetsky, Serge 92, 334
Grahn, Alexander 392
Graner, F. 340
Graw, K.-U. 384
Gray, C.G. 341, 369
Greenside, Henry 323
Gregorio, Enrico 392
Greiner, Jochen 391
Grimaldi, Francesco 221
Grinder, John 168, 328
Gross, R.S. 336
Grossmann, A. 343

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

G

GRÜNBAUM

Grünbaum, Branko 342
Gutierrez, G. 341
Gácsi, Zoltán 391

H
Haber, John 391
Hagen, J.G. 335
Hagen, John 98
Hain, Tim 393
Hakonen, P.J. 350
Halberg, F. 331
Haley, Stephen 391
Halley, Edmund 133
Halliwell, J.J. 331
Hamilton, William 296
Hammerl, German 395
Hardcastle, Martin 391
Hardy, Godfrey H. *130*
Hare, Trent 394
Harriot, T. 296
Harris, S.E. 330
Hartman, W.K. 338
Hausherr, Tilman 391
Hawkins, Daniel 360, 395
Hayes, Allan 391
Hays, J.D. 336
Heath, Thomas 334
Heber, U. 338
Heckel, B.R. 338
Heisenberg, Werner 237, 264
Heller, E. 343
Hellinger, Bert 341
Helmholtz, Hermann von *253*
Helmond, Tom 391
Hembacher, S. 344
Henbest, Nigel 337
Henderson, Paula 391
Henon, M. 340
Henson, Matthew 374
Hentig, Hartmut von 7
Herbert, Wally 337
Herrmann, F. 345
Herschel, William 104
Hertz, H.G. 334
Hertz, Heinrich 179
Hertzlinger, Joseph 392
Hestenes, D. 340
Heumann, John 391
Hewett, J.A. 338
Hewitt, John Suchocki & Leslie A. 327
Hewitt, Paul G. 327
Hietarinta 225
Hietarinta, J. 343
Hietarinta, Jarmo 219, 226, 392
Higashi, R. 350
Hilbert, David 181, 200
Hillman, Chris 391
Hipparque 101
Hirano, M. 340
Hirota 225
Hirota, R. 343
Hodges, L. 339
Hodgkin 217
Hodgkin, A.L. 342
Hoeher, Sebastian 345
Hof, B. 348
Hohenstatt, M. 344
Hollander, E. 344
Hong, F.-L. 350
Hooke 130
Hooke, Robert *121*, 206
Horace, Quintus Horatius Flaccus 162
Huber, Daniel 391
Hudson, R.P. 345
Humphreys, Roberta 336
Humphreys, W.J. 347
Hunklinger, Siegfried 345
Hunter, D.J. 333
Huxley 217
Huxley, A.F. 342
Huygens, Christiaan *74*, 122, 214
Huygens,Christiaan 123
Héraclite 16
Héraclite d'Éphèse 25, 189
Hörnchen, Ingrid 395

I
IBM 234
Ifrah, G. 294
Illich, Ivan *320*, 322
Imae, Y. 333
Imbrie, J. 336
Ingram, Jay 343
Ivanov, Igor 391
Ivry, R.B. 331

J
Jacobi, Carl 180
Jaeger-LeCoultre 394
Jahn, O. 342
Jalink, Kim 391
James, M.C. 339
Jamil, M. 391
Jammer, M. 338
Janek, Jürgen 391
Japan Aerospace Exploration Agency 394
JAXA 394
Jeffreys, Harold 99
Jen, E. 347
Jennings, G.M. 343
Jensen, Hans 348
Johansson, Mikael 391
Johnson, Ben 60, 332
Johnson, Samuel 289, 320
Johnston, K.J. 333
Jones, Gareth 351
Jones, H. 296
Jones, Quentin David 391
Jones, Tony 350
Jong, Johan de 395
Jong, Marc de 391
Joule, James 253
Joutel, F. 339
Ju, L. 351
Jules Verne 180
Jürgens, H. 279
Jürgens, Hartmut 44

K
Köppe, Thomas 391
Kadanoff, L.P. 347
Kamiya, K. 381
Kanada Yasumasa 352
Kanecko, R. 340
Kant, Emmanuel 139
Kantor, Yakov 323
Karl, G. 341, 369
Karstädt, D. 345
Katori, H. 350
Kawagishi, I. 333
Keesing, R.G. 330, 351
Kelu, Jonatan 391
Kelvin 253
Kemp, David 213

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

K

KEMPF

Kempf, Jürgen 331
Kenderdine, M.A. 334
Kendrick, E. 340
Kennard, E.H. 328
Kepler 129, 130
Kepler, Johannes 120, 129
Kerswell, R. 348
Keyence 393
Kirby, Jack 394
Kirchoff, Gustav 214
Kiss, Joseph 391
Kistler 241
Kistler, S.F. 344
Kitaoka Akiyoshi 392
Kivshar, Y.S. 347
Klaus Tschira Foundation 392
Koch, G.W. 343
Kolberg, Ulrich 392
Koolen, Anna 391
Koomans, A.A. 344
Kopeikin, Sergei 391
Korteweg 218
Krehl, P. 344
Krehl, Peter 245
Krijn, Marcel 391
Krotkow, R. 339
Kruskal, M.D. 342
Kruskal, Martin 219
Królikowski, Jarosław 391
Kubala, Adrian 391
Kudo, S. 333
Kurths, Jürgen 338
Kuzin, Pavel 391
Kvale, E.P. 335
Kötter, K. 347
Kötter, Karsten 277, 395
Küstner 336
Küstner, Friedrich 101

L

La Caille 121
Lagrange 186
Lagrange, Joseph-Louis 175
Lalande 121
Lambeck, K. 335
Lancaster, George 341
Landauer, Rolf 347
Lang, K.R. 65
Larsen, Jeffrey 336
Laskar, J. 340
Laskar, Jacques 151
Laskkar, J. 339
Laurent de Lavoisier, Antoine *74*
Laveder, Laurent 394
Lavenda, B. 346
Laws, Kenneth 348
Le Verrier, Urbain 136
Lecar, M. 340
Lega, Joceline 347
Legendre, A. 296
Lehmann, Paul 297, 349
Leibniz 81, 130, 173, 180, 330
Leibniz, G. 296
Leibniz, Gottfried 175
Leica Geosystems 393
Lennard, J. 295
Lennerz, C. 373
Leon 225
Leon, J. J.-P. 343
Lesage, G.-L. 340
Leucippe d'Élée 232
Lewallen, Charles 394
Libbrecht, Kenneth 278, 392
Lichtenberg, Georg Christoph 30
Lim Tee Tai 243, 244, 392
Lim, T.T. 345
Linde, Johan 392
Lintel, Harald van 391
Lissauer, J.J. 339, 348
Liu, C. 330
Lloyd, Seth 346
Lodge, Oliver 99
Lodovico Lagrangia, Giuseppe 175
Lohse, Detlev 394
Lombardi, Luciano 391
Loschmidt, Joseph *229*
Louis Lesage, Georges 150
Louis Moreau de Maupertuis, Pierre *94*
Luca Bombelli 391
Lucretius Carus, Titus 233
Lucretius Carus, Titus 32
Lucrèce 32, 233
Luethi, Thomas 394
Luke, Lucky 244
Léonard de Pise *294*
Lévy-Leblond, Jean-Marc 90, 150, 327
Lüders, Klaus 327
Lütjens, Jörn 364, 395

M

MacDonald, G.J.F. 335
MacDougalls, Duncan 107
Mach, Ernst *76*
Maekawa, Y. 333
Magariyama, Y. 333
Mahoney, Alan 391
Mahrl, M. 348
Malin, D. 65
Mallat, Stéphane 343
Malley, R. 340
Mandelbrot, Benoît 44, 227
Mandelstam, Stanley 341
Mannhart, J. 344
Marcus, Richard 328
Mark, Martin van der 270
Mark, Martin van der 391
Markus, M. 347
Marsaglia, G. 341
Martikainen, J.E. 350
Martin, A. 342
Martina 225
Martina, L. 343
Martos, Antonio 391, 392
Martz, Paul 228, 395
Marx, Groucho 291
Massa, Corrado 391
Matthews, Robert 339
Maupertuis 94
Maynard, Finian 33
Mayné, Fernand 391
Mayr, Peter 391
Mays, David 395
McCoy, Ray 92, 394
McLaughlin, William 328
McLean, H. 332
McMahob, T.A. 343
McMillen, T. 344
McNaught, Robert 393
McQuarry, George 391
Medien Werkstatt 393
Melo, F. 347
Mendoza, E. 348

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

M

MERCKX

Merckx, Eddy 85
Merrit, John 391
Mertens, K. 348
Mettler-Toledo 394
Mettrie, J. Offrey de la 281
Michaelson, P.F. 313
Michel, Stanislav 81
Michell, John *125*
Michelson, Albert 98
Mikkola, Seppo 339
Milankovitch, Milutin 103
Mineyev, A. 343
Mirabel, I.F. 331
Mirsky, S. 365
Mohazzabi, P. 339
Mohr, P.J. 351
Monitz, E.J. 334
Moore, J.A. 341
Moortel, Dirk Van de 391
Moreira, N. 342
Morgado, Enrique 393
Morlet, J. 343
Moser, Lukas Fabian 391
Mozurkewich, D. 333
Muller, R.A. 343
Mulligan, J.F. 334
Munk, W.H. 335
Muramoto, K. 333
Murata, Y. 340
Murdock, Ron 391
Mureika, J.R. 340
Murillo, Nadia 391
Murphy, R. 296
Murray, C.D. 339
Muskens, O. 343
Muynck, Wim de 391
Möllmann, K.-P. 345
Möllmann, K.P. 345
Möllmann, Klaus-Peter 251, 395
Müller, G. 348
Müller, Gerhard 283, 395

N

Namba, K. 333
Namouni, F. 339
Namouni, Fathi 391
Nanosurf 234
Nansen, Fridtjof 334
Napiwotzki, R. 338
Napoléon 135
Nassau, K. 70
Nauenberg, M. 337
Navier, Claude *237*
Needham, Joseph 341
Nelson, A.E. 338
Neuhauser, W. 344
Neuhauser, Werner 395
Neumaier, Heinrich 391
Neumann, Dietrich 132, 338
Newcomb, Simon 136, 339
Newton 130, 311, 330
Newton, Isaac 30, 94, 121
Nicolis, Grégoire 346
Niederer, U. 199, 342
Niepraschk, Rolf 392
Nieuwpoort, Frans van 391
Nieuwstadt, F.T.M. 348
Nightingale, J.D. 341
Nobel, P. 343
Noda, Claro 395
Noether, Emmy 200
Nolte, John 329
Nonnius, Peter 54
Novikov, V.A. 341, 369
Nuñes, Pedro 54

O

O'Keefe, R. 337
Oberdiek, Heiko 392
Oberquell, Brian 391
Offner, Carl 391
Offrey de la Mettrie, J. 281
Oostrum, Piet van 391
Oppenheimer, Robert 182
Origone, Simone 394
Oughtred, W. 296

P

Page, Don 391
Page, Janet 392
Pahaut, Serge 391
Pais, A. 342
Panov, V.I. 339
Pappus 72
Park, David 327
Parks, David 391, 393
Parlett, Beresford 23
Parménide 17, 62
Parménide d'Élée 16
Pascazio, Saverio 391
Paschotta, Rüdiger 394
Pasi, Enrico 391
Paul, T. 343
Peano, G. 296
Peary, Robert 120, 337, 374
Pěč, Karel 332
Peeters, Bert 391
Peitgen, H.-O. 279
Peitgen, Heinz-Otto 44
Pekàr, V. 339
Pempinelli, F. 343
Perc, M. 334
Perelman, Yakov 223, 327
Perini, Romano 391
Perrin, J. 346
Perrin, Jean *261*, 346, 387
Peterson, Peggy 55, 393
Petit, Jean-Pierre 325
Phillips, R.J. 338
Piaget, Jean 329
Piccard, Auguste 240
Pietrzik, Stefan 393
Pikovsky, Arkady 338
Pinker, Steven 331
Pinno, F. 345
Pinno, Frank 395
Planck, Max 262
Platon 232, 285
Pline l'Ancien, Gaius Plinius Secundus 327
Plisson, Philip 21, 392
Plutarque 168
Pohl, Robert 327
Pohl, Robert O. 327
Poincaré, Henri 105
Poinsot, Louis 98
Polster, B. 345
Pompeius, Gnaeus 168
Prescott Joule, James *253*
Preston-Thomas, H. 345
Price, R.H. 78
Pritchard, Carol 391
Proença, Nuno 391
Protagoras 311
Ptolémée 53
Purves, William 391

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

P

PUTKARADZE

Putkaradze, V. 348
Putkaradze, Vakhtang 282, 395
Putterman, S.J. 337
Pythagore 220
Päsler, Max 341
Pérez–Mercader, J. 331

Q
Quinlan, G.D. 339

R
Rahtz, Sebastian 392
Ramanujan, Srinivasa 130
Randi, James 21
Rankl, Wolfgang 391
Rawlins, D. 337
Raymond, David 324
Recorde, R. 296
Recorde, Robert *295*
Redondi, Pietro 30, 229, 391
Rees, W.G. 327
Regiomontanus, J. 296
Reichl, Linda 345, 347
Reimers, D. 338
Renselle, Doug 391
Reppisch, Michael 391
Richtmeyer, F.K. 328
Rieder, Heinz 357, 395
Rieflin, E. 333
Rieker Electronics 393
Rinaldo, A. 342
Rindt, Jochen 31
Rivas, Martin 391
Robert Mayer, Julius 84, 251
Robertson, Will 392
Robutel, P. 339
Rodgers, Tony 393
Rodin, Auguste 123
Rodríguez, L.F. 331
Rohrbach, Klaus 336
Roll, P.G. 339
Romer, R.H. 379
Rosek, Mark 394
Rosenblum, Michael 338
roue ultime 392
Rousset, Sylvie 395
Ruben, Gary 391
Rudolf Hertz, Heinrich 162
Rudolff, C. 296
Rudolff, Christoff 349
Ruffini, Remo 348
Ruga, Spurius Carvilius 290
Ruppel, W. 339
Rusby, R.L. 345, 351
Rusby, Richard 351
Russel, Bertrand 177
Russel, J.S. 342
Russo, Lucio 327
Rutherford, Ernest 22
RWE 395
Régnier, Gilles 394

S
S.R. Madhu Rao 391
Sade, Donatien de 162
Sagnac, Georges 99
Sanctorius de Padoue 78
Sands, R.B. Leighton & M. 327
Santini 225
Santini, P.M. 343
Santorio Santorio 78
Santorre Santario 78
Sattler OHG, Erwin 394
Sattler-Rick, Stéphanie 394
Sauer, J. 373
Sauerbruch, Ferdinand 385
Saupe, D. 279
Saupe, Dietmar 44
Savela, Markku 190, 394
Scagell, Robin 394
Schiller, Britta 391, 392
Schiller, C. 344
Schiller, Christoph 194, 395
Schiller, Isabella 391
Schiller, Peter 391
Schiller, Stephan 391
Schlichting, H.-J. 373
Schmidt, Klaus T. 333
Schmidt, T. 348
Schmidt-Nielsen, K. 347
Schneider, Jean 342
Schneider, Wolf 349
Schooley, J.F. 345
Schulte 110
Schwartz, Richard 328
Schwenk, K. 347
Schwenkel, D. 344
Schönenberger, C. 344
Schörner, E. 373
Scime, E.E. 373
Scott Russell, John *217*
Scott, Jonathan 391
Scriven 241
Scriven, L.E. 344
Segrè, Gino 345
Sexl, Roman 48
Shackleton, N.J. 336
Shakespeare, William 21
Shalyt-Margolin, A.E. 346
Shapiro, A.H. 335
Shapiro, Asher 96
Sheldon, Eric 391
Shen, Amy 395
Sheng, Z. 344
Shephard, G.C. 342
Sherham, roi 27
Shinjo, K. 340
Short, J. 351
Siart, Uwe 392
Siche, Dietmar 395
Sierra, Bert 391
Sigwarth, J.B. 339
Sillett, S.C. 343
Silverman, M. 333
Simon Laplace, Pierre *135*
Simon, Julia 391
Simon, M.I. 333
Simonson, A.J. 379
Simplicius de Cilicie 285
Singh, C. 334
Singleton, Douglas 391
Sissa Ben Dahir 27
Slabber, André 391
Smith, George 349
Smoluchowski, Marian von 261
Socrate 285
Soldner, J. 339
Soldner, Johann 140
Solomatin, Vitaliy 391
Sonett, C.P. 335
Spence, J.C.H. 344
Spencer, R. 331
Spiderman 244
Spinelli, Matthew 393
Spiropulu, M. 338
Sreedhar, V.V. 342

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

S

STEDMAN

Stedman, G.E. 335, 351
Steiner, Kurt 344
Stengel, Ingrid 331
Stephenson, Richard 335
Steur, P.P.M. 345
Stewart, I. 329
Stewart, Ian 47
Stieber, Ralph 394
Stoney, G.J. 350
Stoney, George Johnston 305
Stong, C.L. 333
Story, Don 392
Strunk, William 349
Su, Y. 339
Sugiyama, S. 333
Sum, Robert 395
Surdin, Vladimir 391
Surry, D. 332
Sussman, G.J. 340
Swackhamer, G. 340
Swenson, C.A. 345
Swift, G. 347
Swinney, H.L. 347
Swope, Martha 348
Szczepanski, Daniela 395
Szilard, L. 346
Szilard, Leo 263

T

Tabor, D. 341
Tait, P.G. 296
Takamoto, M. 350
Talleyrand 124
Tamman, Gustav 242
Tarko, Vlad 391
Tarski, Alfred 46, 228
Tartaglia, Niccolo 29
Taylor, B.N. 351
Taylor, G.J. 338
Taylor, J.H. 309
Tegelaar, Paul 391
Telegdi, V.L. 347
Tennekes, Henk 393
Tetzlaff, Tim 393
Thaler, Jon 391
Thies, Ingo 391
Thinktank Trust 393
Thompson, Dave 392
Thomson (Kelvin), William 253
Thomson, W. 345
Thomson-Kelvin 247
Thoroddsen, Sigurdur 395
Topper, D. 338
Torge, Wolfgang 332
Toschek, P.E. 344
Townsend, Paul 391
Trefethen, L.M. 335
Tregubovich, A.Ya. 346
Trevorrow, Andrew 392
Truesdell, C. 345
Truesdell, Clifford 30
Tsang, W.W. 341
Tschichold, J. 349
Tsuboi, Chuji 332
Tsukanov, Alexander 392
Tucholski, Kurt 191
Tuppen, Lawrence 391
Turner, M.S. 336
Twain, Mark 91

U

Ucke, C. 373
Uffink, J. 346
Uguzzoni, Arnaldo 391
Ulam, Stanislaw 275
Umbanhowar, P.B. 347
Umbanhowar, Paul 276, 277, 395
Universität Augsburg 234
université du Northwestern 393
Upright, Craig 392

V

Vandeginste, Eric 245, 247
Vandewalle, N. 344
Vanier, J. 350
Vannoni, Paul 391
Vareschi, G. 381
Verne, Jules 379
Vernier, Pierre 54
Vincent, D.E. 338
Vitali, Giuseppe 44
Viviani, Vincenzo 97
Volin, Leo 391
Vollmer, M. 345
Vollmer, Michael 251, 395
Voltaire 153, 180, 311
von Smoluchowski, Marian 259
Vorobieff, P. 348
Voss, Herbert 392
Vuorinen, R.T. 350
Völz, Horst 350

W

Wagon, Stan 47, 331
Wald, George 265
Waleffe, F. 348
Walgraef, Daniel 347
Walker, Jearl 328
Wallis, J. 296
Walter, Henrik 341
Warkentin, John 392
Weber, R.L. 348
Webster, Hutton 349
Wedin, H. 348
Wegener, Alfred 101, 336
Wehner, R. 337
Weierstall, U. 344
Weierstrass, K. 296
Weil, André 296
Weiss, M. 332
Weiss, Martha 391
Wells, M. 340
Weltner, K. 344
Weninger, K.R. 337
West, G.B. 342
Westerweel, J. 348
Weyl, Hermann 39
Wheeler, John 353
White, E.B. 349
White, M. 336
Whitney, C.A. 65
Widmer-Schnidrig, R. 342
Wienerroither, Peter 354, 395
Wierda, Gerben 391
Wierzbicka, Anna 331, 391
Wijk, Mike van 391
Wilder, J.W. 373
Wiley, Jack 345
Wilhelm Bessel, Friedrich 102
Wilhelm von Leibniz, Gottfried 62
Wilkie, Bernard 334
Williams, G.E. 335

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Wilson, B. 343
Wisdom, J. 340
Wise, N.W. 313
Wittgenstein, Ludwig 15, 23, 25, 38, 64, 86, 164, 168, 267
Wittlinger, M. 337
Wittlinger, Matthias 119
Wolf, H. 337
Wolfsried, Stephan 393
Wolpert, Lewis 328
Wright, Joseph 392
Wulfila 292

Y
Yamafuji, K. 344
Young, Andrew 391
Young, Thomas 82
Yourgray, Wolfgang 341

Z
Zabusky, N.J. 342
Zabusky, Norman 219
Zaccone, Rick 392
Zakharian, A. 335
Zalm, Peer 391
Zanker, J. 330
Zedler, Michael 391
Zeilinger, A. 350
Zhao, C. 351
Ziegler, G.M. 46
Zimmermann, H.W. 346
Zimmermann, Herbert 264
zoo de Naples 393
Zweck, Josef 336
Zénon d'Élée 14, 16, 52, 62
Zürn, W. 342

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

INDEX DES SUJETS

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où le mot-clé est défini ou présenté en détail. L'index des sujets joue donc le rôle d'un glossaire.

Symboles

(296
) 296
+ 296
− 296
· 296
× 296
: 296
< 296
= 296
> 296
≠ 296
$\sqrt{}$ 296
∇ 296
Δ 296
∞ 296

A

@ (arobase) 295
a (année) *34*
Abeilles à miel 77
aberration *94*, 102
abjad *293*
absolu, espace 97
abugida *293*
abélien ou commutatif *193*
Academia del Cimento 58
accents, dans la langue grecque *292*
accumulation 248
accélération *63*
accélération angulaire 88
accélération centrifuge 112, 122
accélération de Coriolis *96*, 335, 369
accélération de marée *137*
accélération gravitationnelle, standard 63
accélérations, maximales 110
accéléromètre 355
acier *245*
acier inoxydable 246
aciers austénitiques *245*
aciers ferritiques *245*
aciers martensitiques *245*
Acinonyx jubatus 33
acteurs *322*
action *174*, *197*
action physique *173*
action, principe de moindre 129
action, quantum *263*
actionneurs 159
activité 19
activité tectonique 132
addition *193*
additivité 32, 37, 41, 78
additivité de l'aire et du volume *45*
ADN 43, 311
ADN (humain) 185
adénosine triphosphate 334
affaire Roswell 223
âge de la Terre 317
âge de la Voie lactée 318
âge du Soleil 318
agrégats de matière *182*
aiguille sur l'eau 243
aiguilles d'une horloge 50
ailes 237
air *385*
Airbus 356
alchimie 30
Aldébaran 66, 186
aleph 293
Alice au pays des merveilles – De l'autre côté du miroir *264*
Alpes 128, 151
Alpha du Centaure 186
alphabet *292*
alphabet cyrillique *292*
alphabet gotique *292*
alphabet grec *291*
alphabet hébreu *293*
alphabet latin *289*
alphabet phonématique *293*
Alphabet Phonétique International 289
alphasyllabaires 293
Altaïr 185
aléatoire *165*
amas de galaxies 184
Amazone 101, 221
âme 107
amortissement *158*, 206, *212*
amour 125
amplitude *208*
ampoule, température 252
ampère *300*
analemme 147
anges 19, 71
angle 88
angle apical 363
angle de mélange électrofaible

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

A

ANGLE

314
angle zénithal 122
angle, plan 52
angle, solide 52
angles dièdres 46
angles entre les osselets 53
anneaux, astronomiques, et marées 137
année tropicale 315
année, nombre de jours 138
année-lumière 315
Antarès 66, 186
anti-bulles 243
anti-hermitienne *195*
anti-unitaire *195*
antigravité *134*, *143*
antimatière 79
Antiqua *292*
antisymétrie 195
aphrophore 63
aphélie *318*
API 289
aplatissement de la Terre 94
apogée 317
Apollo 376
appareil photographique 52
apprentissage *23*
apprentissage de la mécanique 157
apprentissage, meilleure méthode 9
approximation du continu *66*
arbre 311
arbre, croissance 187
arbre, généalogie 25
arbre, hauteur limite 230
arbres *230*
arbres et pompage de l'eau 343
arc-en-ciel 198
arche de Saint Louis 363
archipallium 329
arcs de vin 282
Arcturus 186
argent, définition humoristique 380
argon 385
Aristote 374
Armillaria ostoyae 43, 77
arobase *295*
arrangements compacts de cercles 363
arrière-plan *24*, *25*, 39
artefact 68
artilleurs et l'effet Coriolis 96
artéfact 301
arènes 38
ascenseur spatial 244
ash *290*
aspirées *292*
associativité *193*
astre, âge 35
astres sombres 185
Astrid, un atome 343
astrologie 130, 147
astronomes, les plus petits connus 132
astronomy picture of the day 325
astrophysique 321
astéroïde 146
astéroïdes 149, 186
astéroïdes troyens *135*
atmosphère de la Lune 272
atomes *233*
atomes, manipulation un à un 233
atomique, microscope à force 234
Atomium *247*
ATP 80, 334
atto 302
attraper la banane 90
auto-adjointe *195*
auto-organisation *172*
auto-similarité *44*
avancée du périhélie *104*, 134
avant Jésus-Christ *298*
avions 76
avions en papier 325
axe de la Terre 103
axe de la Terre, mouvement 101
axe, impossible chez les êtres humains *366*
axe, Terre 103
azote 239
aînés *322*

B

Babylone 297
Babyloniens 152
bactérie 85
bactéries 68
baignoire, tourbillon 335
balais 143, 381
Balance 147
balance 106, 245
balance de salle de bains 106
Baleine 147
baleines 222, 224
balle de cricket 359
balle de ping-pong 111
balles de golf 359
ballons 258
bandes dessinées 244
barre de chocolat 227
barycentre 149
bases de lancement de fusées 110
basilic *118*
Basiliscus basiliscus 117, 118
bateau 80
bateau en papier, compétition 240
bateaux, vitesse critique 222
Beaufort 33
beauté 17, *275*, 279
beauté, origine 275
becquerel 302
beer 243
beth 293
biche 23
billard 75
bimorphes 159
biographies de mathématiciens 324
biologie *159*
biologie quantitative 321
Bip Bip 244
BIPM 300, 301
bismuth 35
bobine 18
Boraginaceae *190*
bouchon 80, 109
bougie 28, 273
boulier *294*
bouteille 80, 109

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

B

BOUTEILLE

bouteille de vin 80, 109
bouteille pleine 171
bouton futur 265
boîtes de conserves de petits pois 114
brebis, grec 292
bruit 259
bruit de grenaille *232*
bruit, (physique) *217*
buissons épineux 67
bulles 241
Bureau International des Poids et Mesures 300
Bélier 147
Bételgeuse 65, 186

C

c. *298*
cadrans solaires 38
cailloux 65
calcul des variations *180*
calcul lunaire 122
calendrier 297, 298
calendrier grégorien *298*
calendrier julien *297*
calendrier lunaire *35*
calendrier moderne *298*
calorie *310*
Calpodes ethlius 60
camarades *322*
caméscope 264
canal sonore 222
canards, nage 222
Cancer 147
candela *300*
Canopus 185
canoë-kayak 118
Capella 186
Capricorne 147
capture, gravitation universelle 149
cartésiennes *42*
Cataglyphis fortis 119
caténaire 363
causale 165
causalité du mouvement 165
cavitation *110*
ceinture de Kuiper 148, 184
Celsius 250
centi 302
centre de gravité 146
centre de masse *88*, 146
centre galactique 105
cerveau 271
cerveau et physique, paradoxe 287
Cetus *147*
chaleur 254
chaleur & pression *159*
champ gravitationnel *127*
chandelle 307
changement 25
changement d'esprit *20*
chaos *278*, 279, *280*, 280
chapitre, symbol 297
charge *200*
charge de Noether *200*
charge du positron 313
charges, petites 240
charrette orientée vers le sud 170
chat 80
Chaussée des Géants 47
chaînette 54
chenilles 60
cheval-vapeur 85
cheveux, diamètre 43
chiffres arabes *294*
chiffres indiens *294*, 294
Chimborazo, mont 128
chimie 286
chocolat 239
chocolat, ne dure pas pour toujours 228
Chomolungma, Mont 242
Chomolungma, mont 128
chute *122*
chute d'une averse 60
chute de la Lune 122
chute et envol sont indépendants 58
chute libre non verticale 95
chute libre, vitesse 33
chute parabolique 59
chutes du Niagara 281
ciel, en déplacement 101
cinglés 325
cinématique *57*, *155*
cinématique, viscosité 283
cinétique, moment *88*
circalunaires 132
circonspection 317
circulation sanguine 67
citations mathématiques 325
claquement du fouet 245
classique, mécanique 155
Clunio 132
Coca Cola Light 243
CODATA 351
coefficient de traînée *161*, 286
coin, film inférieur gauche 24, 25
collisions 81, *159*
Commission Internationale des Poids et Mesures 300
commune, mouche 125
compacité 37, 41
complexes, écritures 293
complexité *263*
complétude 37, 41, 78
comète 133
comète, de Halley 133
concaténation *192*
concepts 287
conditions initiales *163*
configuration *25*
Conférence Générale des Poids et Mesures 300, 311
connaissance, définition humoristique 380
conservatifs *160*
conservation 78, 205
conservation de l'énergie 84, 128, *201*
conservation de la masse implique conservation de la quantité de mouvement 76
conservation de la quantité de mouvement 79
conservation de la quantité de mouvement découle de la conservation de la masse 76
conservation du moment cinétique 129
consommation de carburant

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

C

CONSOMMATION

286
consommation énergétique des premiers pays du monde 84
constance de la nature 16
constante cosmologique 315
constante de Boltzmann 258, *259*, 260, 263, 267, 314
constante de couplage de Fermi 314
constante de couplage fort 314
constante de couplage gravit. 314
constante de Hubble 315
constante de la loi du déplacement de Wien 315
constante de Planck originale 313
constante de Planck réduite 313
constante de Rydberg 314
constante de Stefan–Boltzmann 315
constante de structure fine *303*, *314*, 314
constante du gaz parfait *250*, 388
constante du ressort 206
constante gravitationnelle *121*
constante magnétique 314
constante électrique 314
constellation du Serpentaire 147
constellations 65, 147
contenant 39
continuité *23*, 32, 37, *40*, 41, 78, *197*
contraintes *179*
contraintes anholonomiques *179*
contraintes non holonomiques *179*
convection *256*
Convention du Mètre 300
conversion de bits en entropie 315
coordonnées *41*
coordonnées généralisées 179, *181*
coordonnées rationnelles 319
Copernicus 334
coquille, gravité intérieure 148
corps *24*
corps connexes *67*
corps humain, émission de lumière 308
corps, rigides 170
corpuscule *65*
cortex 23
cosmonautes 376
cosmos *25*
couche d'Ekman 335
couche limite 380
couleur blanche ne persiste jamais *255*
coulomb 302
couple 88
couples *196*
courbe de sinus *206*
courbes de Reuleaux *355*
courbure 51
courir diminue le poids 144
courir sur l'eau 337
courriel *322*
course cycliste 72
course en arrière 115
court, instant *16*
CPT 203
crackle *366*
crayon, invention 30
criquets 117
croissance *20*, *172*, 275
croissance capillaire 33
croissance d'un nodule de manganèse en plaine abyssale 33
croissance des arbres 33
croissance du lichen 33
croissance humaine 33
croyances 21
création *16*
création du mouvement 79
créature vivante, la plus grande 43
crête d'onde *212*
cuillère 113
cuisine 286
culture de l'esprit 139
cumulonimbus 222
curiosité *18*, 167
curiosités 26
curvimètre 44
cycle 216
cycle menstruel 338
cycles menstruels 132
cémentite 246
césium 35

D

∂ 296
dx 296
daleth 293
dame, circonspecte 180
de vision nocturne, lunettes 308
degré Celsius 302
degré de liberté thermodynamique *267*
degré, unité d'angle *302*
densité baryonique 316
densité de photons 316
densité lumineuse *308*
densité moyenne de la Terre 317
dents 275
description *57*
descriptions, exactitude des 287
dessins en coins 24
diagramme d'espace des phases 59
diagramme d'espace des états 59
diagramme d'espace-temps 59
diamant 188
diamant, brisure 244
Dieu 106, 118, 135, 328, 330
diffraction *212*
diffusion 271, 273
différentielle *61*
digamma 291
dilatations *199*
dimensionalité 32, 41
dimensions 40
direction 32
discernement 32
disparition du mouvement 79

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

D

DISPERSION

dispersion *212*, *213*
dispositifs antigravitants 143
disques durs, frottements 162
dissipatifs *160*
dissipatifs, systèmes *162*
distance *43*
distance moyenne de la Lune 317
distinction 37, 41, 78
distinguer *23*
distribution gaussienne *261*
distribution, normale gaussienne *261*
divergence *126*
doctorat, s'amuser pendant 284
DoLittle 180
données solaires 325
double personnalité 166
dromion *225*
durée *35*
durée du jour, passé 35
Dutch Balloon Register 395
duvet 256
d*x* 296
dyadique, produit 296
dynabee 115
dynamique *155*
déca 302
déci 302
découpage des volumes 46
Défi sur le stationnement 50
défi, classement *9*
défi, niveau *9*
défis 9, 16, 18, 22–24, 26–31, 33–56, 58–64, 66–68, 70–72, 75, 76, 78–86, 88–92, 95–99, 102, 103, 105–116, 118–120, 122–138, 140–146, 148–151, 153–155, 157–159, 161, 163–171, 174, 175, 177, 179–184, 186–191, 193–201, 205, 206, 208–214, 216, 217, 220–225, 227, 228, 230, 231, 233, 235, 237–245, 247, 251, 253, 255–266, 268–276, 279–283, 286–288, 302, 303, 305–307, 310–313, 315, 317, 319, 330, 350, 352
dégénérescence 271
déjections 60
délibéré, mouvement 160
démarche *92*
déplacement *19*
déplacement d'un spermatozoïde 33
déplacement des continents 33, 101
déplacement du ketchup 33
dérivée *61*
dérivée en un point *61*
détecteurs de mouvement 28
déterminisme *165*, *166*, 281
déviation de la lumière à proximité d'une masse 140
dévonienne 138

E

e.g. 298
eau 343
eaux mortes *209*
écart-type *286*, *312*
échappement, vitesse 146
échelle de longueur 273
échelle de Mercalli 113
échelle de température 345
écho 213
éclair 307
éclair, vitesse 34
éclairement lumineux *307*
éclairement énergétique *307*
écliptique *129*
écoulement 248
écoulement de l'énergie 79
écoulement de la quantité de mouvement 79
écoulement du temps 38
écriture *289*
écriture gothique *292*
écriture runique 290
effet catapulte *145*
effet de fronde gravitationnelle *145*
effet de serre *257*
effet Josephson 301
effet Leidenfrost 241
effet papillon *280*
effet photoacoustique *270*, *271*
effet Sagnac *99*, 370
effets magnétiques *159*
effets électriques *159*
effort *156*
eicosane 261
élasticité *159*
électromagnétisme *125*
électronvolt *305*
Élée 232
élément d'un ensemble 32, 37, 41, 78
élément inverse *193*
élément neutre *193*
éléments *25*
éléphants 222, 275
ellipse 123, 133
émergence 281
émergentes, propriétés 281
émettre des ondes 213
EMS98 113
énergie *81*, *82*, 82, 158, *186*, 197
énergie cinétique *81*, 95
énergie d'une onde *211*
énergie d'une vague 224
énergie de rotation *89*
énergie mécanique spécifique 365
énergie potentielle *127*
énergie thermique *251*
énergie, généralisation d'échelle 197
énergie, indépendance pour l'observateur 197
enfance 33, 39
énigme de Peirce 49
énigme des horloges 50
énigme du mouvement circulaire 54
énigmes d'horloges 328
ensembles, connexes 62
entonnoir 241, 243
entropie *249*, *254*, 287
entropie, minimale dans la nature 263
entropie, quantum 264
entropie, état de plus haute 274
Epargyreus clarus 60, 332
épaules 92

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

épiderme 67
éponymes *299*
épouse 333
EPR 299
épure d'Ackermann 361
équation de Bernoulli *235*
équation de Davey–Stewartson 225
équation de Korteweg–de Vries *219*
équation de Poisson *126*
équation différentielle *359*
équations d'évolution *164*
équations de Lagrange du mouvement *180*
équations de Navier–Stokes *237*
équilibre 254, *256*
ères glaciaires 336
erreurs aléatoires *312*
erreurs systématiques *312*
ESA 324
escaliers 38
Escherichia coli 68
espace *168*
espace blanc *297*
espace des configurations *59*, 59
espace des phases *25*, *163*
espace euclidien *41*, 41
espace galiléen *41*
espace indispensable 42
espace vectoriel *64*
espace vectoriel euclidien *31*, 32
espace vectoriel, euclidien *64*
espace vide 126, 211
espace, absolu 41
espace, ascenseur 244
espace, physique *39*
espace, relatif ou absolu 42
espace-temps *25*
espace-temps, relatif ou absolu *43*
essieu de roue, effet 366
et al. 298
étalon, pomme 311
état *163*
état d'une masse ponctuelle, complet *163*
état de mouvement *26*
état, physiquel *26*
états *25*, *168*
étendue *235*
étendus non rigides, corps *170*
éternité 81
eth *290*, 348
ethel *290*
éthique 167
Étoile polaire 185
étoile à neutrons 184
étoile, classes 185
étoiles 65, 185
être vivant, le plus lourd 77
étude de l'urine 283
étude de Shell 334
étude des toilettes 283
Eucalyptus regnans 230
évaporation 271
événement *34*
Everest, Mont 242
Everest, mont 128
évier, tourbillon 335
évolution 25
évolution biologique *20*, 275
évolution cosmique *20*
exa 302
exactitude *286*, *312*
excentricité *134*
excentricité de l'orbite de la Terre 104
exclusif *163*
existence des nœuds 41
expansion *250*
expansion de l'univers 105
expansions *199*
explosions nucléaires 222
exposant de Lyapounov *280*
expérience du film d'huile 229
expérience du seau, Newton 106
extinction des feux 215
extrémale 177

F

facteur Q *206*
Falco peregrinus 33
familiarité 23
fantômes 26, 71
farad 302
faucon pèlerin 33
faux *287*
femmes 132, 332
femmes, dangers de leur observation 116
femto 302
feuille, chute 243
feuilles d'arbre et rotation de la Terre 99
Fiat Cinquecento 240
figures en coins 24
fil à plomb 47
filament incandescent 252
film en coin, inférieur gauche 24, 25
film saccadé 24
film saccadé, explication 57
fini 267
flagelles *68*
flamme 28, 111, 269
flocon de neige, chute 33
flocons de neige 347
flux d'entropie 256
flux d'énergie 307
flèche du temps 39
flûte 206
fonction delta 215
fonction lagrangienne *175*
fonctions de Bessel *102*
force *76*, 88
force atomique, microscope 372
force centrale *76*
force centrifuge 128
force de Coriolis 334, 369
force de traînée *158*
force, definition 156
force, physique *156*
force, usage de 156
Ford et la précision 286
formation du système solaire 100
forme 41, *65*, *235*
forme de la Terre *146*
forme de tresses 283
forme, optimale 161

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

F

FORMULATION

formulation par rayon *150*
formule de l'escalier *119*
formule de Stirling 271
formules, ISO 348
formules, les aimer 28
forêt 23
fouet, vitesse 33
four à ciment 367
foyer 365
fractales *44*, 63, *227*
frontières *70*
frottement 80, *158*, 158, 255, 265
frottement d'adhérence *158*
frottement dynamique *160*
frottement entre les planètes et le Soleil 81
frottement planète–Soleil 81
frottement Soleil–planète 81
frottement statique *158*, 161
frottement, importance du 255
frottements produits par les marées 138
Froude, nombre critique 222
fréquence *208*
fréquence de rotation 87
fumée 260
futhark *290*
futhorc *290*, 292
futur, bouton 265
futur, déterminé 165
futur, se rappeler 264

G

Gaia 280
galagos 117
galette, pure 234
galette, silicium 234
galvanomètre 159
gaussienne, distribution *261*
gaz *258*
gaz parfait *250*, *258*
Gerridae 118
giga 302
gimel 293
gnomonique *36*
gnomons 36
Gondwana 101
goutte 161
gouttes de pluie 161
GPS 35
gradient *125*
Grande Grèce 232
grandes marées *138*
grandeurs *197*
gravitation *120*, *159*
gravitation et mesures 287
gravitationnelle, masse 140
gravité à l'intérieur des coquilles de matière 148
gravité, action réciproque 125
gravité, centre de 146
gravité, essentiel 150
gray 302, *306*
grec, alphabet *291*
groupe de galaxies 184
groupe, mathématique *193*
gruyère 227
grâce *91*, 284, 328
Gulf Stream *335*
GUT 204
guépard 33, 63
guépards 117
gymnastes 90
gyroscope *97*
géants 230
Gémeaux 147
générateurs *200*
géocentrique, système 150
géodésiques 162
géoïde *128*

H

hanches 92
hareng, pet 223
harmonique, mouvement 206
hasard 165
haut-parleur avec laser 270
haut-parleur invisible 270
hecto 302
Helmholtz 84
henry 302
hermitienne *195*
hertz 302
Hesperiidae 60
heure *302*
Himalaya, âge 35
hodographe 59, *122*, 145
Hollywood, films 173, 227, 333
hollywoodien 180
holonomiques *180*
holonomiques–rhéonomiques *179*
holonomiques–scléronomiques *179*
homogénéité 37, 41
homomorphisme *195*
Hooke 129
hopi *331*
horloge *36*, 81, 124
horloge, actionnée par la pression de l'air 81
horloge, permutation des aiguilles 50
horloges *36*, *168*
houppe 344
Hubble, télescope spatial 325
huile 80, 241
humour *282*
humour, physique 325
hydrogène atomique *309*
hyperbole 133
hyperbolique *133*
Hébreu, alphabet *293*
hélice 366
hélices dans la nature 67
hélicité des escaliers 38
hélicoptère 242
hélicoptères 325
héliocentrique, système 150
hélium 184, 252, 271
hélium, superfluide 240
hérésie 229

I

i.e. 298
ibid. 298
IBM 395
iceberg 77
idem *298*
idéal *42*
Île de l'Expérience 20
Ile de l'Expérience *15*
Ile,Expérience *15*
illico presto *81*
illimité *197*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

illusion sur la taille de la Lune 53
Illusions d'optique 325
image *71*
images *25*
imaginer *191*
imprévisible *165*
impulsion 202
impédance caractéristique du vide 314
impénétrabilité 78
impénétrabilité de la matière 30
incertitude totale *312*
inclinaison de l'orbite de la Terre 104
indice de réfraction *188*, *382*
indices *292*
inductions *201*
indépendance des points de vue *190*
inertie *71*
inertielle, masse 140
inf. 298
infini 32, 37, 41, 78
infini en physique *62*
infinitude 32, 37, 41
infinitude, ouverture 78
information 262
information, effacement *271*
information, quantum 264
informatique théorique 321
infrasons *224*
injectif 195
inoxydable, acier 246
insecte claqueur 117
insectes 132, 273
instabilité *23*
instant *30*, *34*
instant humain 35
Institut Clay de mathématiques 237
intensité lumineuse *307*
interaction *25*, *156*
interférence *211*
interféromètre 76, 98
interféromètres 310
interféromètres en anneau 310
Internet *321*, 322
intervalles de temps *37*
intégration *45*, *175*
invariance 78, *192*
invariance d'échelle 230
invariance par translation 37, 41
invisibilité des objets *66*
invisible, haut-parleur 270
Io 138
ionosphère, ombre 115
irréductible *195*
irréversibilité du mouvement 165
irréversibles *255*
isolé, système 257
isomorphisme *195*
isotoméographe *98*
Istiophorus platypterus 33
italique *289*

J

jambe 124
jauge, changement *192*
jerk 163, *366*
jeter 347
jeu 21
jeu d'échecs 27
jouets, physique 325
Joule 84
joule 302
jour intercalaire 297
jour sidéral 315
jour, longueur 138
jour, unité de temps *302*
journée ensoleillée 307
jours de la semaine, ordre des 153
Jupiter 150, 185
juristes 72
Jésus 118

K

k-calculus *355*
katal 302
Kelvin 84
kelvin *300*
kilo 302
kilogramme *300*
kilogramme standard *73*
kilotonne 83
Klitzing, von – constante 315
koppa 291
képhir 185

L

l'infini *16*
l'Épi 185
l'état permet la distinction 26
la variation d'orientation ne nécessite pas de toile de fond 90
lacets 40
lacets des chaussures 255
lagrangien *175*
lagrangien non unique 180
laminarité *235*
lancer 22
lancer, importance du 22
langues sur Terre 293
largeur totale de la courbe à la moitié du maximum 312
laser en anneau 335
laser, haut-parleur 270
latin 299
Latin, alphabet *289*
le mouvement *25*
le mouvement est le changement d'état des objets *26*
le mouvement est le changement de position dans le temps *57*
le temps est ce que nous lisons sur une horloge *36*
le temps est déduit en comparant des mouvements *35*
Lego 233
les atomes ne sont pas indivisibles *268*
librations *131*
libre arbitre *166*
ligne droite 51
limicoles 337
limite de Roche *379*
Lion 147
litre *302*
livre et physique, paradoxe

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

287
livres *289*
livres, information et entropie 262
logarithmes 130
« loi » de Bernoulli 241
« loi » de Listing *116*
« loi » de l'attraction universelle *122*
« loi » universelle de la gravitation *121*
loi de Bode 152
loi de Laplace–Gauss *312*
loi de Titius 152
loi normale *261*
longueur *40*, *43*, *64*, *288*
longueur d'onde *209*, 212
longueur d'onde de Compton 315
longueur d'onde de de Broglie 301
longueur de côte infinie 44
longueur de la côte 44
longueur gravitationnelle de la Terre 317
longueur, saut 332
lumen 302
luminosité 307
luminosité du Soleil 317
lumière *159*
lumière, vitesse de groupe lente 330
Lune 122
Lune, atmosphère 272
Lune, chute 122
Lune, dangers 138
Lune, phases 150
Lune, taille angulaire 53
lunes de Jupiter 152
lunettes de vision nocturne 308
Lunokhod 376
lustre 124
lux 302, 307
lévitation *134*
lézard 118

L

LIVRES

M

M82, galaxie 63
mach *76*
machine 68
machine d'Atwood 375
machine à mouvement perpétuel *81*
machines à café 255
magie 325
magnitude de Richter *112*
magnétisation des roches 101
magnétisme 76
magnéton nucléaire 315
marbre, recouvert d'huile 80
marche 255
marche, robot 188
Mars 306
marée, accélération *137*
marées 96, 132, 136, 335
marées et frottements 138
masse *73*, 78, 158, *288*
masse conservée 74
masse de Jupiter 318
masse de la Lune 317
masse de la Voie lactée 318
masse du Soleil 317
masse gravitationnelle *140*
masse inertielle *71*, *140*
masse ponctuelle *65*
masse, centre de 146
masse, galiléenne *78*
masse, négative 78, 79
masse, équivalence entre gravitationnelle et inertielle 141
mater les jolies filles 115
math forum 324
mathématiciens 324
mathématiques 31, 321
matins, quiétude 222
matière *65*, *71*
matière en forme de coquille, gravité intérieure 148
matière, impénétrabilité 30
matrice, adjointe *195*
matrice, antisymétrique *195*
matrice, conjuguée complexe *195*
matrice, orthogonale *195*
matrice, réelle *195*
matrice, symétrique *195*
matrice, transposée *195*
Mentos 243
Mercure 136
merde 60, 332
mesurable 32, 37, 41, 78
mesure *31*
mesure de Banach *45*
mesure de la vitesse d'une balle 49
mesure de la vitesse de la lumière 49
mesures 288
mesures et gravitation 287
MFA, microscope à force atomique 234
micro 302
microscope à force atomique 234, 235, 372
microscopes à force atomique 162
microscopes à force latérale 162
mile 303
milieu ambiant *24*
milli 302
minimale, vitesse 27
minuscules comètes *148*
minute *302*, *318*
minéralogie 324
miroir cosmique 325
moindre effort *187*
mois 297
mole *300*
molécules 233
moment 36
moment cinétique *87*, 88, 112
moment cinétique, extrinsèque *88*
moment cinétique, intrinsèque *88*
moment d'inertie *87*, 88, 198, 205
moment d'inertie, extrinsèque *88*
moment d'inertie, intrinsèque *88*
monde 14, *25*
monocycle *72*, 247
Montagne Mouvement 15

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

M

MORALE

morale 167
mort 14, 81, 168, 200, 229
morts 87
moteur de fusée 159
moteur flagellaire 85
moteur à ultrasons 159
moteur, linéaire 159
moteur, électrostatique 159
moteurs 159
moteurs thermoacoustiques 274
motif aléatoire 24
mouches 24
moulin solaire 159
mouvement *21*, *168*
mouvement brownien 261
mouvement comme illusion 16, 17
mouvement de l'œil 40
mouvement dû aux particules 22
mouvement et contorsion de forme *67*
mouvement et unités de mesure 301
mouvement fluide stationnaire *235*
mouvement fondé sur le frottement 158
mouvement harmonique *206*
mouvement n'existe pas 16
mouvement perpétuel *79*
mouvement perpétuel, première et seconde espèce 81
mouvement polaire *101*
mouvement relatif *24*
mouvement volontaire 164
mouvement, manifestations 15
mouvement, non-Fourier *330*
mouvement, passif *21*
mouvement, simple 22
mouvement, supraluminique 265
mouvement, volontaire *21*
mouvements passifs 164
mouvements volontaires *158*
moyenne *180*
multiplet *193*
multiplication *192*
munition, vitesse 33
myosotis *189*
mystère 15
mystère du mouvement 14
mètre *300*
mécanique *155*
mécanique classique *155*
mécanique des fluides *170*
mécanique des milieux continus *171*
mécanique quantique *155*, 321
mécanique statistique *171*
méga 302
mégatonne 83
mémoire 27, 255
mémoriser *23*
méridien *124*
Mésopotamie 289
métallurgie 286
métrique 32, 37, 41, 78
météorites 224

N

nabla 296
naines 185
naines brunes 185
nano 302
Nanoarchaeum equitans 185
NASA 306
NASA 325
natation, olympique *222*
nature *25*
naturel *42*
navigateur 322
navigation 80
navire 77, 238
navires et relativité 84
Neptune 148, 150
neutrino 235
Newton 38
newton 302
NGC 2240 252
Niagara 228
Nit 308
niveaux des défis *16*
nombre d'Avogadro *229*, 314
nombre de Loschmidt *229*
nombre de Reynolds *283*
nombre infini de préfixes du SI 311
nombres *197*
nombres réels 37, *41*
non-causalité *165*
nonius *54*
normale, loi 312
normalité *351*
normalité de π 319
norme *64*
notation exponentielle 51
notation positionnelle *294*
notes de cours 324
nuage d'Oort 148, 184
nucléaire *159*
nucléon 235
numérotation Olympique des années 298
nutation *103*
néocortex 329

O

∅ 296
objet *24*, 32, *71*
objets *25*, *168*
obliquité *103*
observables *26*, *197*
observables, discrètes *197*
observations physiques *191*
obturateur 52
octet *196*
océanographie *225*
odomètre 44
œil 24
office des montgolfières, hollandais 395
ohm 302
ombre de l'ionosphère 115
ombre de la Terre 115
ombre de la Terre pendant une éclipse 122
ombre des cadrans solaires 38
ombres 70, 333
ombres et attraction des corps 150
onde statique 213
onde, harmonique *208*
onde, linéaire *208*
onde, réflexion 211

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

O

ONDE

onde, sinusoïdales *208*
ondes de choc *225*
ondes de gravité *210*
ondes de tension superficielle *210*
ondes solitaires *218*
ondes, eau *210*
ondes, longitudinales *209*
ondes, transverses *209*
op. cit. 298
Ophiuchus *147*
opérateur 126
opérations de symétrie *192*
opérations à poitrine ouverte 385
or *357*
ordinateurs 271
ordre 37, 41, 78, *275*
oreille 40, 43, 213, 232, 342
organisations croyantes 71
originalité 26
origine, humain 14
Orion 65
orthogonalité 64
oscillation 206
oscillation, harmonique ou linéaire 206
oscillons *276*
osmose *159*, 271
otoacoustique *213*
OVNI 223
oxygène 239

P

π et la gravité 123
π, normalité de *318*
pain 229, 357
parabole 54, *59*, 123, 133
parabolique *133*
parachutes 160
paradoxe sur la physique des livres 287
parallaxe *94*, *102*
parallélépipède 89
paramètre d'ordre *278*
parapluie 60
pardon 22
parenthèses 295
paresse, universelle, loi de 177
paris, comment en gagner 98
parsec 315
particle data group 323
particule *65*
particule ponctuelle *65*
parties *64*, *266*
pascal 302
passif, mouvement 160
passim *298*
paupière 51
peine de mort 229
pendule 124
pendule court 369
perceuses à percussion 109
perfectionné 294
performance des jambes 117
perles 244
perlite 246
permittivité diélectrique du vide 313
perméabilité magnétique du vide 313
pet comme moyen de communication 223
petit pois, découpage 47
petits pois 114
petits pois ou raviolis 114
phanérophyte, monopodiale *187*
phase *208*, *209*
Philaenus spumarius 63
Phileas Fogg 180
phot 308
physiciens 323
physique *14*
physique de la matière condensée 321
physique des basses températures 259
physique des dessins animés, 'lois' 70
physique des milieux continus 247
physique expérimentale des hautes énergies 321
physique expérimentale nucléaire 321
physique galiléenne 26, *30*, *155*
physique générale 321
physique mathématique 321
physique Newtonienne *30*
physique newtonienne *155*
physique numérique des hautes énergies 321
physique phénoménologique des hautes énergies 321
physique théorique des hautes énergies 321
physique théorique nucléaire 321
physique, définition périmée 21
physique, problèmes 323
physique, quotidien 26
piccolissimi quanti *229*
pico 302
pics de glace 245
pied 241
pierre celtique *113*
pierres 22, 34, 58, 60, 80, 95, 113, 121, 123, 143, 145, 153, 214, 223, 255
pigeons 92
pingouins 92
piézoélectricité *159*
Planck, unités corrigées 305
planète 81
planètes extrasolaires *185*
planètes gazeuses 185
planétoïdes 184, 186
platitude 48
plomb 240
pluie, chute 33
plus petit temps mesuré 35
plus petite distance vérifiée expérimentalement 51
Pluton 148
plèvre 385
pneumothorax *385*
poids *140*, *158*
poids de la Lune 151
point d'exclamation 295
point focal 365
point, mathématiques *41*
points *30*, 66
points de Lagrange *135*
points de libration *135*
points de vue 189

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

P

POINTS

points spatiaux 66
Poissons 147
poissons, yeux 242
polarisation *212*
pomme étalon 311
pommes 72
pommiers 311
ponctuel pour l'œil nu *66*
pop *366*
Pororoca 221
position *25*
positions *64*
positivité 78
potentiel, gravitationnel *125*
pouce 53
poulie 159
poulie composée 28
pouls 124
pralines 239
pression 158, 232, *258*
pression de l'air 81
pression sanguine 241
principale découverte de la science moderne 265
principe d'exclusion 183
principe d'invariance de jauge *192*
principe de Bernoulli *258*
principe de Hamilton *173*
principe de Huygens *214*
principe de la trajectoire la plus courte 162
principe de Mach 76
principe de moindre action 129, *177*
principe de relativité *192*, *356*
principe extrémal *173*
principe variationnel *173*, *177*
prisme 333
prismes de Dove *333*
prix, un million de dollars 237
prière, effets 186
problème du mois en maths 324
problème à plusieurs corps *285*
problèmes auditifs 224
problèmes de Fermi 268
problèmes de physique 323
processus *255*
processus, instantané *167*
Procyon 185
prodiges 295
prodiges du calcul 295
produit de Kronecker 296
produit du temps par la bande passante 216
produit dyadique 296
produit scalaire 41, *64*
produit tensoriel 296
produit vectoriel *89*
profil aérodynamique 161
promenade de Planck 309
prononciation érasmienne *292*
propriété immobile 72
propriété invariante *189*
propriété mobile 72
propriétés émergentes 281
proton, âge 35
protonvolt 306
précession 103
précession d'un pendule 97
précession, équinoxes *101*
précision *18*, 27, 31, 57, *286*, *312*, *313*
précision et plaisir 18
préfixes *302*, 350
préfixes du SI 311
préfixes, SI 302
prépublications électroniques *321*, 323
pseudo-vecteur *112*
PSR 1257+12 185
PSR 1913+16 35
psychokinésie 21
puces 117
puissance 307
puissance d'isolation 256
puissance, définition humoristique 380
puissance, physique *84*, *157*
pulsar, période 35
pulsation 213
pyramide 89
pèse-personne 245
périgée 317
périhélie *136*, *318*
période *208*
périodes glaciaires *103*
péta 302
pôle Nord 38, 101, 128
pôle Sud 128

Q

quadruplets *196*
quantique, mécanique 155
quantité de matière 74, 78
quantité de mouvement *74*, *79*, 82, 158, *186*, *211*
quantité de mouvement comme un liquide 156
quantité de mouvement totale *74*
quantité de mouvement, écoulement 156
quantités *197*
quantités conservées *16*
quantités extensibles *79*
quantités étendues *249*
quantités, conservées *16*
quantités, extensibles *79*
quantum d'entropie *264*
quantum d'information *264*
quantum de conductance 315
quantum du flux magnétique 315
quartz 207
quasar 184
qui glisse, échelle 109
qui indique toujours le sud, charrette 341
quiétude des matins 222

R

R-complex 329
radian *301*
radio speed 34
radioactivité 306
rang 198
rapport de fréquence de Josephson 315
rapport de masse proton–électron 315
raviolis 114
rayon classique de l'électron 315
rayon de Bohr 315

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

R

RAYON

rayon de la Lune 317
rayon de la Terre 317
rayon de Schwarzschild comme unité de longueur *305*
rayonnement *71*, *256*
rayons cosmiques 132
rayons de soleil 356
recherches 162
reconnaître *23*, 23
recouvrement des impôts 300
rectitude 40, *47*, 48
relation d'incertitude 216
relation d'incertitude de la thermodynamique 263
relation d'indétermination 216
relation d'indétermination de la thermodynamique 263
relations *25*
relativité générale et cosmologie quantique 321
relativité restreinte avant quatre ans 191
relativité, principe galiléen *85*
renversement d'espace *199*
repos *17*
repos, galiléen *61*
reproductibilité *190*
représentation *194*
représentation des observables 198
représentations *193*
ressort 206
ressources *322*
Rigel 185
robinets d'eau 281
robot 341
robot, marche 188
roches sédimentaires 101
Rostock, Université de 240
rotation *90*
rotation de la Terre 309
rotation de la Terre, variation 99
rotation des bras 105
rotation horaire 38
rotation, absolue ou relative 106
roue de Compton *98*
roues chez les êtres vivants 67
roues en rotation 90
roues naturelles 68
roulette et mécanique Galiléenne 108
Rubik's Cube 223
rues 374
rugby 82
rythmites tidales *335*
règle de la main droite *89*
règle à calcul 129, *364*
règles de calcul *55*
règles graduées *168*
réchauffement global *257*
récipients 42
réductible *195*
réflexion des ondes 211
réforme du Calendrier grégorien 55
réfraction 188, *212*
référentiels *189*
Régulus 185
réseau global d'infrason *224*
résistance de l'air 161
réticence à tourner 87
réversibilité du mouvement 165
réversibles *255*
rêves d'étoiles 325

S

sable 276
Sagarmatha, mont 128, 242
Sagittaire 105, 147
saison 129
Salmonella 68
sampi 291
san 291
sans dimension 314
satellite *66*, 113
satellite, artificiel *66*
satellites 149, 184
satellites géostationnaires 135
satellites observables 325
satellites Pioneer 63
Saturne 137, 149
saut 117
saut en longueur 60, 83, 332
savon, bulles 241
scalaire *190*, *197*
scharfes S *290*
sciences non linéaires 321
Scorpion 147
seau 18
seconde *300*, *302*, *318*
sections coniques *133*
Sedna *148*
semaine *297*
sens de rotation sur la piste d'athlétisme 38
Sequoiadendron giganteum 77
service au badminton, record 33
Service international de la rotation terrestre *309*, 336, *338*
Service international des latitudes 101, 336
sexe 14, 22, 125
sexisme en physique 233
sextant 337
sha 291
SI, unités *300*
SI, unités supplémentaires *301*
siemens 302
sievert 302, *306*
significatif 18
Simon, Julia 333
simulateur du Système solaire 325
singulets *196*
singulière *195*
Sirius 66, 185
sirène *220*
Sloan Digital Sky Survey 325
smash du badminton 359
smiley *295*
snap *366*
soirées, manque de quiétude 222
Soleil 77, 81, 150, 186
Soleil se lèvera vraiment demain 128
Soleil, arrêt 244
Soleil, taille angulaire 53
soliton *219*
solitons *218*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

S

SONAR

sonar 225
sonoluminescence *110*
soucoupes volantes 223
source 126
sources *126*
sous–marins 222
sous-groupe *193*
spectre photoacoustique 271
spineurs *197*
spirales d'Ekman 335
spiritualité 167
squark 391
stalactite 245
stalagmites 33
stationnaire 177
stationnaires *26*
stationnement de véhicule 50
stigma 291
Stoney, unités 305
structures coopératives *278*
stéradian *301*
succession *34*, 37, 41, 78
sud, charrette orientée vers 170
superamas galactique 184
superfluidité 240
supergéantes 186
superlubrification *160*
supermarché 38
supernovae *110*
superposition *211*
surf 221
surface *40*
surface algébrique 325
surjectif 195
surprises 167, 201
syllabaire *293*
syllabiques, alphabets 293
symboles 295
symétrie *192*
symétrie de permutation *192*
symétrie du lagrangien tout entier 198
symétrie, basse *189*
symétrie, diagonale *195*
symétrie, discrète *192*
symétrie, externe *192*
symétrie, interne *192*
symétries de jauge 200
symétrique *189*
système célestiocentrique 358
système d'unités de Heaviside–Lorentz 305
système d'unités gaussiennes 305
système d'unités électromagnétiques 305
système d'unités électrostatiques 305
système de numération grec *294*
système de numération romain *294*
système fermé *257*
système géocentrique 150
Système géodésique mondial 318, 338
système héliocentrique 150
Système International d'Unités (SI) *300*
système isolé *255*, *257*
système limbique 329
système physique *26*
système solaire 184
système solaire, avenir du 151
systèmes conservatifs 179
systèmes dissipatifs *162*, *179*, *278*
systèmes holonomiques *179*
systèmes simples *281*
systèmes, conservatifs *127*
séisme, déclenchement 244
séismes 112, 336
série arithmétique *354*
série géométrique *354*

T

taille *39*
taille de la Lune, apparente 122
taille de la Voie lactée 318
taille des chaussures 311
tantale 35
taupin 117
Taureau 147
tectonique 336
tectonique des plaques *101*
temps *26*, *34*, *168*, *288*
temps absolu 37
temps crucial 37
temps d'obturation 52
temps des éphémérides *36*
temps galiléen *37*
temps local *35*
temps propre *36*
temps universel coordonné *35*, *309*
temps, absolu 37
temps, définition du 201
temps, flèche 39
temps, relatif ou absolu 42
temps, écoulement 38
température *249*, *250*, 250
température absolue *250*
température du fond diffus micro-onde 316
température la plus basse 251
température, minimale dans l'univers 252
tenseur *198*, 198
tenseur, ordre 198
tension superficielle *161*
tensoriel, produit 296
Terre 94, 256
Terre vue de l'espace 325
Terre, aplatie 94
Terre, creuse 48
Terre, découpage 47
Terre, forme *128*
Terre, masse *125*
Terre, ombre 115
Terre, plate 366
Terre, rotation 309
Terre, s'arrête de tourner 128
Terre, vitesse 34
Terre, âge 35
tesla 302
test du gorille pour les nombres aléatoires 165
testicule 333
thermodynamique *253*
thermodynamique, deuxième principe 271
thermodynamique, premier « principe » de la 84
thermodynamique, premier principe *253*
thermodynamique, principe

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

T

THERMODYNAMIQUE

zéro *250*
thermodynamique, relation d'incertitude 263
thermodynamique, second « principe » de la 84
thermodynamique, second principe *255*
thermodynamique, troisième principe *251*
thermométrie 345
thermométrie acoustique 345
thermométrie magnétique 345
thermométrie à bruit 345
thermométrie à rayonnement 345
thermométrie à rayonnement optique 345
thermostatique *253*
thorn *290*, 290, 348
thriller 180
théière 241
théorie de jauge 39
théorie de la Terre concave 358
théorie de la Terre creuse *48*
théorie du monde intérieur 358
théorie quantique 24, 229
théorème de Noether *200*
théorème de Pythagore 52
théorème des axes parallèles de Steiner *88*
théorème ou paradoxe de Banach–Tarski 228
théorème ou paradoxe de Banach-Tarski *46*
tmesure du temps, idéal *36*
TNT, contenu énergétique 315
tog 256
tokamak 252
Tokharien 333
tonne *302*
topologie 41
totale, énergie 127
toucher *71*
tour de lumière 34
tourbillon circulaire 284
tourbillon dans une baignoire ou un évier 335
tourbillon de baignoire 96
tourbillon en anneau 244
tourbillonnement 105
tourbillons 237
tourbillons en anneaux imbriqués 244
trajectoire *57*
trajectoire de la Lune autour du Soleil 145
trajet *57*
transformations *20*, *192*
transforme *80*
transformée de Fourier 224
transformée en ondelettes *224*
translation du temps *199*
transport d'Ekman 335
transsubstantiation *229*
travail *82*, 95, *179*
travail, physique *157*
tremblement de terre *112*, 368
tremblement de terre, déclenché par les hommes 244
tremblements de terre 112, 132, 336
triboscopes 162
tronc cérébral 23
trous 26
trous noirs 165
troyen, astéroïde 135
trépied 159
tsunami 210
tube de Compton *98*
tube de Venturi 237
tube à tourbillons 274
tube à tourbillons de Ranque-Hilsch 273
TUC 35
tunnel à travers la Terre 153
turbulence 237, 281
Tyrannosaurus rex 118
télescope 221
télépathie 186
téléphone, vitesse 34
téléportation 80
télévision 23
témoignage 333
téra 302
tétraèdre 52, 89

U

udeko 302
udekta 302
UICPA 351
UIPPA 351
unicité 37, 41
Unicode 293
Union Géodésique et Géophysique Internationale 318
unitaires *195*
unité 256, *300*
unité astronomique 315
unités *41*
unités astronomiques 152
unités de base *300*
unités de Planck corrigées *305*
unités de Stoney 305
unités naturelles de Planck *303*
unités SI 312
unités, non SI 303
unités, véritables naturelles *305*
univers *25*, 164
univers bidimensionnel 56
univers, bidimensionnel 56
univers, description par la gravitation universelle 142
universalité de la gravitation 135
universelle, paresse, principe de 169
URL 322
UseNet 322
UTC 35

V

vagues 210
vagues océaniques, les plus hautes 220
vagues, courtes 210
vagues, longues *210*
vagues, peu profondes 210
vagues, profondes *210*
vagues, vitesse de groupe 222
valeurs propres 195
variables *26*
variance *312*
variation de la quantité de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

V

VARIATION

mouvement *156*
variation de la rotation de la Terre 99
Varuna 184
vecteur *64*, *198*
vendeko 302
vendekta 302
vernier *54*
verre *242*
Verseau 147
vide 233
vide, exposition humaine 111
vie, la plus courte 35
vieille dame circonspecte 180
Vierge 147
vin 229
vis viva *81*
vision aristotélicienne *157*
vitesse *61*, *208*, *288*
vitesse angulaire *87*, 88
vitesse comme une dérivée 62
vitesse d'oiseau 33
vitesse d'échappement 146
vitesse de l'électron 33
vitesse de la lumière à l'intérieur du Soleil 33
vitesse de la Terre dans l'univers 105
vitesse de lancer, record 50
vitesse de marche 124
vitesse de rotation 87
vitesse du lancer, record 33
vitesse du signal nerveux 33
vitesse du son 33, 76, 99
vitesse galiléenne *31*
vitesse infinie 288
vitesse n'est pas Galiléenne 32
vitesse propre 34
vitesse, la plus élevée 34
voiles 237
voilier 33
voiture, poids 259
volcans 336
volt 302
volume 46
voyage dans l'espace 110
voyages dans le temps 105
Vulcain *136*
Vulcanoïdes *186*
Véga 185
Véga au pôle Nord 101
véhicules 286
vélaires 291
véliplanchistes 90
vélo 71
vélo, poids 259
vélocimètre 355
vérifier *191*

W

watt 302
waw 291
weber 302
Weib 332
weko 302
wekta 302
Wirbelrohr *273*
WMAP 376
world question center 325
World Wide Web *322*
wyn *290*

X

xenno 302
xenta 302

Y

yeux des poissons 242
Yo-Yo 123
yocto 302
yogh *290*
yot 291
yotta 302

Z

zepto 302
zetta 302
zippo 280
Zodiaque *129*
zénith 113
zéro 294

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'Aventure de la Physique – Vol. I

Chute, Flux et Chaleur

Pourquoi le changement et le mouvement existent-ils ?
Comment l'arc-en-ciel se forme-t-il ?
De tous les voyages possibles, lequel est le plus fantastique ?
L'« espace vide » est-il réellement vide ?
Comment pouvons-nous faire léviter des objets ?
À partir de quelle distance entre deux points
devient-il impossible d'en intercaler un troisième ?
Que signifie « quantique » ?
Quels problèmes demeurent sans réponse en physique ?

En répondant à ces questions ainsi qu'à d'autres sur le mouvement, cette collection constitue une introduction à la physique moderne qui se veut divertissante tout en mettant l'esprit à l'épreuve, chaque page proposant une surprise ou un défi à l'imagination.

En partant de la vie quotidienne, cette aventure donne un aperçu des derniers résultats en mécanique, thermodynamique, électrodynamique, relativité, mécanique quantique, gravité quantique et leur unification. Ce texte s'adresse aux étudiants du premier cycle universitaire et à tous ceux qui s'intéressent à la physique.

Christoph Schiller, titulaire d'un doctorat de l'Université Libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique.

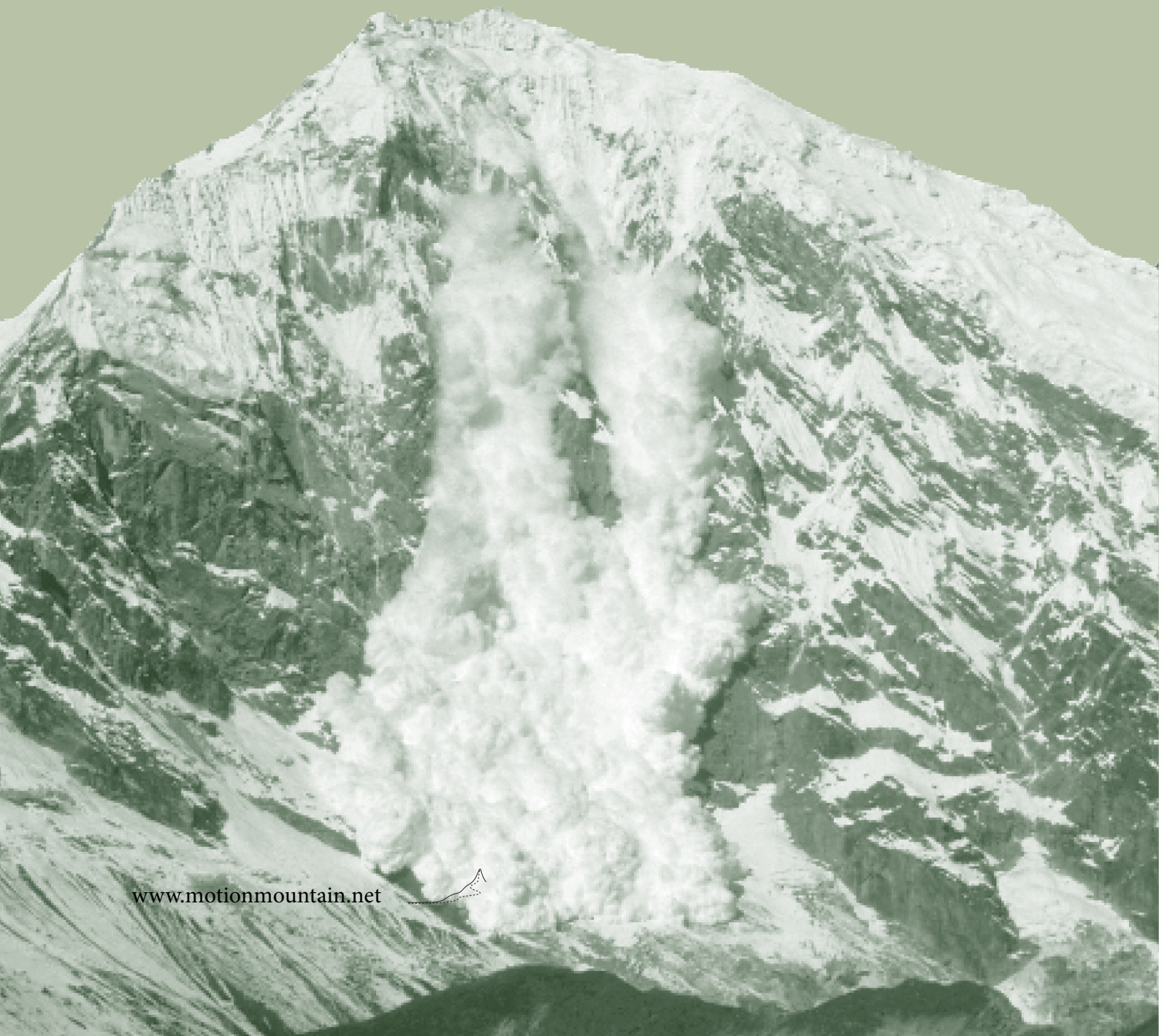
disponible gratuitement sur www.motionmountain.net

Christoph Schiller

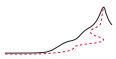
LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL. II

LA RELATIVITÉ

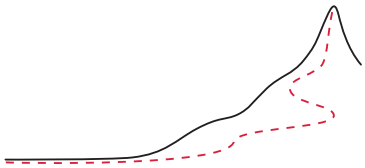


www.motionmountain.net



Christoph Schiller

La Montagne Mouvement



L'Aventure de la Physique
Volume II

La Relativité

Traduit de l'anglais par Benoît CLENET

23e édition, disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net

Editio vicesima tertia.

Proprietas scriptoris © Christophori Schiller
secundo anno Olympiadis vicesimae nonae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliquo, quod
partem horum verborum continet ; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Vingt-troisième édition.

Copyright © 2009 Christoph Schiller,
deuxième année de la 29e Olympiade.

Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne
dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/deed.fr,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction,
distribution et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel*
produit ou service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée
sans le consentement écrit du détenteur du droit d'auteur.
Toute personne est libre de consulter, enregistrer et imprimer
ce fichier pdf pour son usage personnel, et de le diffuser par
des moyens électroniques, mais uniquement sous sa forme originale
et de manière entièrement gratuite.

À Britta, Esther et Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.

PRÉFACE

« Primum movere, deinde docere*. »
Antiquité

Ce livre s'adresse à toute personne curieuse de la nature et du mouvement. La curiosité portant sur la manière dont se meuvent les gens, les animaux, les choses, les images et l'espace nous entraîne dans de multiples aventures. Ce volume présente les meilleures d'entre elles dans le domaine de la relativité. Par la vitesse de la lumière c, la relativité restreinte impose une limite aux vitesses de l'énergie ; la relativité générale circonscrit la force par la force maximale $F \leqslant c^4/4G$. On montre que dans le cadre de ces deux domaines, toutes les équations découlent de ces limitations. Cette manière simple, intuitive et inhabituelle d'appréhender la relativité et la cosmologie devrait récompenser la curiosité de chaque lecteur – qu'il soit étudiant ou professionnel.

Dans la structure de la physique moderne, indiquée sur la Figure 1, la relativité recouvre deux domaines importants. Le présent volume – le deuxième d'une collection qui en compte six – propose un tour d'horizon de la physique ; il résulte d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990 : présenter le mouvement d'une manière simple, moderne et vivante.

Afin d'être *simple*, le texte se focalise sur les concepts, tout en donnant aux mathématiques le niveau minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules dans les calculs. Tout ce texte est à la portée d'un étudiant qui accède au premier niveau universitaire.

Afin d'être *moderne*, ce texte est enrichi par les nombreux joyaux – aussi bien théoriques qu'empiriques – qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *vivant*, ce texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale, ce devrait être comme assister à un spectacle de magie. Nous observons, nous nous étonnons, nous n'en croyons pas nos yeux, nous réfléchissons, et finalement nous comprenons le truc. Lorsque nous observons la nature, nous faisons souvent cette même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui mettra la sagacité du lecteur à l'épreuve. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise de ce texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre sur la pédagogie due à Hartmut von Hentig, se traduit ainsi : « Fortifier les hommes, clarifier les choses ». Clarifier les choses nécessite du courage, puisque changer les habitudes de pensée engendre la peur, souvent masquée par la colère. Mais en surpassant nos peurs

* « D'abord émouvoir, ensuite enseigner ». Dans les langues modernes, ce type mentionné de *mouvement* (celui du cœur) est souvent appelé *motivation* : ces deux termes sont issus de la même racine latine.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

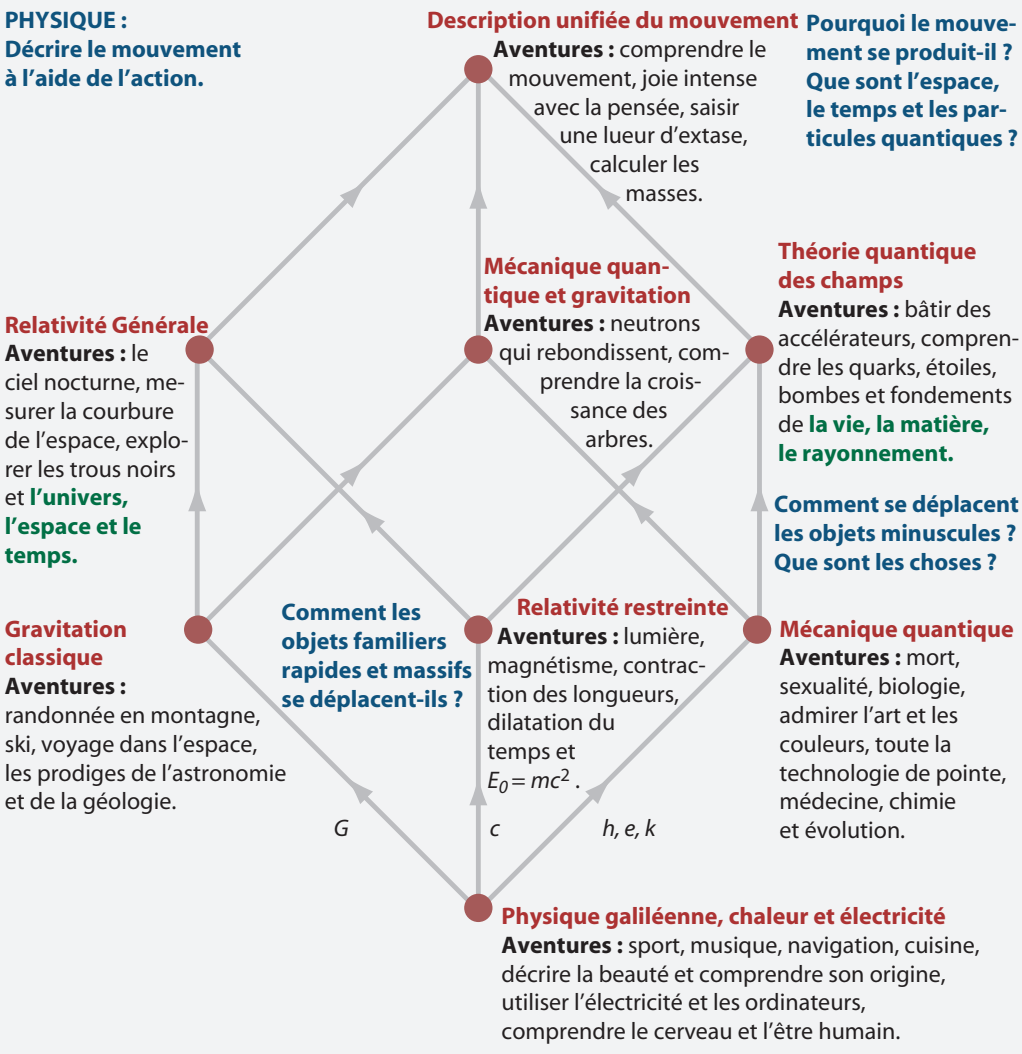


FIGURE 1 Une carte complète de la physique : les connexions sont définies par la vitesse de la lumière c, la constante de la gravitation G, la constante de Planck h, la constante de Boltzmann k et la charge élémentaire e.

nous gagnons en force. Nous ressentons alors des émotions intenses et enivrantes. Toutes les grandes aventures de la vie – et explorer le mouvement en est une – mènent à cela.

Munich, 10 Janvier 2009.

Remerciement

Je remercie Benoît Clénet pour sa traduction de ce volume. Sa patience, son énergie et son professionnalisme sont exemplaires.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Conseil au lecteur

D'après mon expérience d'enseignant, je connais une méthode d'apprentissage qui est toujours parvenue à transformer des élèves en échec en élèves gagnants : si vous lisez un livre pour l'étudier, résumez chaque section que vous lisez, *dans vos propres termes, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, lisez la section une nouvelle fois. Recommencez jusqu'à ce que vous puissiez résumer clairement ce que vous avez lu avec vos propres mots, à voix haute. Vous pouvez le faire tout seul dans votre chambre, ou avec des amis, ou tout en marchant. Si vous faites cela avec tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'apprentissage et de lecture de manière significative. De surcroît, vous prendrez beaucoup plus de plaisir à apprendre avec des bons ouvrages et détesterez nettement moins les mauvais manuels. Les prodiges de cette méthode peuvent même l'utiliser tout en écoutant un cours, à voix basse, évitant ainsi de prendre constamment des notes.

Comment utiliser ce livre ?

Le texte en vert, que l'on trouve dans un grand nombre de notes en marge, signale un lien sur lequel on peut cliquer dans un lecteur pdf. Ces liens en vert sont soit des références bibliographiques, des notes de bas de page, des références croisées vers d'autres pages, des solutions aux défis ou des pointeurs vers des sites Web.

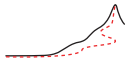
Les indices et solutions des *défis* sont donnés dans l'annexe. Les défis sont classés ainsi : niveau recherche (r), difficile (d), niveau étudiant standard (s) et facile (e). Les défis des types r, d ou s pour lesquels aucune solution n'a encore été incorporée dans le livre sont marqués (pe).

Appel à contribution

Ce texte est et demeurera librement téléchargeable depuis Internet. En échange, envoyez-moi s'il vous plaît un bref courriel à fb@motionmountain.net, à propos des questions suivantes :

— Qu'est-ce qui n'était pas clair ?
— Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris ?
Défi 1 s — Qu'est-ce qui devrait être amélioré ou corrigé ?

Vous pouvez également ajouter votre retour directement sur www.motionmountain.net/wiki. Au nom de tous les lecteurs, merci par avance pour votre collaboration. Si votre contribution est particulièrement pertinente, et si vous le souhaitez, votre nom sera mentionné dans les remerciements, ou bien vous recevrez une récompense, ou les deux. Mais par-dessus tout, très bonne lecture !



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

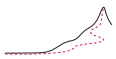


Table des Matières

15 1 Vitesse maximale, observateurs au repos et mouvement de la lumière

Pouvons-nous jouer au tennis en utilisant une pulsation laser en guise de balle et des miroirs comme raquettes ? 20 • La relativité restreinte en quelques lignes 24 • Accélération de la lumière et effet Doppler 26 • La différence entre la lumière et le son 29 • Pouvons-nous tirer plus vite que notre ombre ? 30 • La composition des vitesses 32 • Les observateurs et le principe de relativité restreinte 33 • Qu'est-ce que l'espace-temps ? 37 • Pouvons-nous voyager dans le passé ? – Temps et causalité 39

41 **Curiosités de la relativité restreinte**

Plus vite que la lumière : jusqu'où pouvons-nous voyager ? 41 • Synchronisation et voyage dans le temps – une mère peut-elle rester plus jeune que sa propre fille ? 41 • Contraction des longueurs 44 • Images relativistes – aberration et effet Doppler 47 • Quelle est la meilleure place dans un bus ? 50 • À quelle vitesse pouvons-nous marcher ? 51 • La vitesse de l'ombre est-elle plus grande que la vitesse de la lumière ? 51 • La parallèle à une parallèle n'est pas parallèle – la rotation de Thomas 54 • Une histoire sans fin – température et relativité 55

56 **Mécanique relativiste**

La masse en relativité 56 • Pourquoi le jeu du billard relativiste est plus difficile 58 • La masse est de l'énergie concentrée 59 • Collisions, objets virtuels et tachyons 62 • Systèmes de particules – absence de centre de masse 64 • Pourquoi la plupart des mouvements sont-ils si lents ? 65 • L'histoire de la formule de l'équivalence masse–énergie de De Pretto et Einstein 65 • Quadrivecteurs 66 • Quantité de mouvement relativiste 69 • Quadriforce 71 • La rotation en relativité 71 • Mouvement ondulatoire 73 • Action d'une particule libre – comment les choses bougent-elles ? 74 • Transformations conformes – pourquoi la vitesse de la lumière est-elle constante ? 75

77 **Observateurs en accélération**

Accélération pour des observateurs inertiels 79 • Référentiels accélérés 80 • Horizons des événements 84 • L'accélération modifie la couleur 86 • La lumière peut-elle aller plus vite que c ? 86 • Qu'est-ce que la vitesse de la lumière ? 87 • Limites sur la longueur des corps solides 88

90 **La relativité restreinte en quatre propositions**

La vitesse de la lumière a-t-elle pu fluctuer ? 90 • Que se passe-t-il près de la vitesse de la lumière ? 91

92 2 Relativité générale : gravitation, vitesse maximale et force maximale

Force maximale – toute la relativité générale dans une formule 93 • Les limites d'une force et d'une puissance maximales 94 • L'évidence expérimentale 97 • En déduire la relativité générale 98 • L'espace-temps est courbé 103 • Conditions de validité des limites de la force et de la puissance 105 • Expériences de pensée et paradoxes sur la force limite 105 • Expériences de pensée sur la puissance limite et le flux limite de masse 111 • La vérité se cache 114 • Une compréhension intuitive de la relativité générale 115 • Une perception intuitive de la cosmologie 118 • Défis expérimentaux pour le troisième millénaire 119 • Un résumé de la relativité générale 120 • Remerciements 121

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

123 3 Les idées nouvelles sur l'espace, le temps et la gravité

Repos et chute libre 123 • Qu'est-ce que la gravité ? – Une deuxième réponse 124 • Ce que les marées nous enseignent à propos de la gravité 128 • Espace courbe et matelas 130 • Espace-temps courbe 132 • La vitesse de la lumière et la constante gravitationnelle 134 • Pourquoi une pierre jetée en l'air retombe-t-elle sur la Terre ? – Les géodésiques 136 • La lumière peut-elle tomber ? 139 • Curiosités et défis amusants sur la gravitation 140 • Qu'est-ce que le poids ? 145 • Pourquoi les pommes tombent-elles ? 146

148 4 Mouvement en relativité générale – lumière courbée et fluctuation du vide

148 **Champs faibles**

Les effets Thirring 149 • Gravitomagnétisme 150 • Ondes gravitationnelles 154 • Fléchissement de la lumière et des ondes radio 162 • Décalage temporel 164 • Conséquences sur les orbites 164 • L'effet géodésique 167 • Curiosités et défis amusants sur les champs faibles 168

169 **Comment la courbure est-elle mesurée ?**

Courbure et espace-temps 173 • Courbure et mouvement en relativité générale 175 • Gravitation universelle 176 • La métrique de Schwarzschild 177 • Curiosités et défis amusants sur la courbure 177

178 **Universalité des observateurs – Mathématiques plus profondes**

La courbure de l'espace-temps 178 • La description de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie 179 • Action de Hilbert – Comment les choses tombent-elles ? 181 • Les symétries de la relativité générale 182 • Équations du champ d'Einstein 183 • Supplément sur la force limite 186 • Retrouver la gravitation universelle 187 • Retrouver la relativité générale linéarisée 187 • Comment calculer la forme des géodésiques 188 • La masse en relativité générale 190 • La gravité est-elle une interaction ? 190 • L'essence de la relativité générale 192 • Gymnastique de Riemann 192 • Curiosités et défis amusants sur la relativité générale 195

196 5 Pourquoi pouvons-nous contempler les étoiles ? – Le mouvement dans l'Univers

Quelles étoiles pouvons-nous admirer ? 196 • Que voyons-nous la nuit ? 199 • Qu'est-ce que l'Univers ? 204 • La couleur et le mouvement des étoiles 205 • Les étoiles brillent-elles toutes les nuits ? 208 • Une brève histoire de l'Univers 210 • L'histoire de l'espace-temps 214 • Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ? 219 • L'Univers est-il ouvert, fermé ou situé entre les deux ? 221 • Pourquoi l'Univers est-il transparent ? 223 • Le Big Bang et ses répercussions 223 • Le Big Bang fut-il un Big Bang ? 224 • Le Big Bang fut-il un événement ? 224 • Le Big Bang fut-il un commencement ? 225 • Le Big Bang implique-t-il une création ? 226 • Pourquoi pouvons-nous voir le Soleil ? 226 • Pourquoi les couleurs des étoiles sont-elles différentes ? 228 • Existe-t-il des étoiles sombres ? 229 • Toutes les étoiles sont-elles différentes ? – Lentilles gravitationnelles 230 • Quelle est la forme de l'Univers ? 232 • Qu'y a-t-il derrière l'horizon ? 233 • Pourquoi y a-t-il des étoiles dans tous les recoins du ciel ? – L'inflation 233 • Pourquoi y a-t-il si peu d'étoiles ? – Le contenu en énergie et en entropie de l'Univers 234 • Pourquoi la matière est-elle amassée en grumeaux ? 235 • Pourquoi les étoiles sont-elles si petites par rapport à l'Univers ? 236 • Les étoiles et les galaxies sont-elles en train de s'éloigner les unes des autres ou est-ce l'Univers qui se dilate ? 236 • Y a-t-il plus d'un Univers ? 236 • Pourquoi les étoiles sont-elles figées ? – Bras, étoiles et principe de Mach 236 • Au

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

repos dans l'Univers 238 • La lumière attire-t-elle la lumière ? 239 • La lumière se désintègre-t-elle ? 239

241 6 Trous noirs – L'éternelle chute
Pourquoi étudier les trous noirs ? 241 • Horizons 241 • Orbites 245 • Entropie et cheveux 247 • Les trous noirs comme sources d'énergie 249 • Curiosités et défis amusants concernant les trous noirs 251 • La genèse et la quête des trous noirs 254 • Singularités 256 • Un petit quiz : l'Univers est-il un trou noir ? 257

258 7 L'espace diffère-t-il du temps ?
L'espace et le temps peuvent-ils être mesurés ? 260 • L'espace et le temps sont-ils indispensables ? 261 • Les courbes fermées de genre temps existent-elles ? 261 • La relativité générale est-elle locale ? – L'argument du trou 262 • La Terre est-elle creuse ? 263 • L'espace, le temps et la masse sont-ils indépendants ? 264

266 8 La relativité générale en dix points – un résumé pour le profane
La précision de cette description 267 • Recherches en relativité générale et en cosmologie 269 • Se pourrait-il que la relativité générale soit différente ? 270 • Les limites de la relativité générale 272

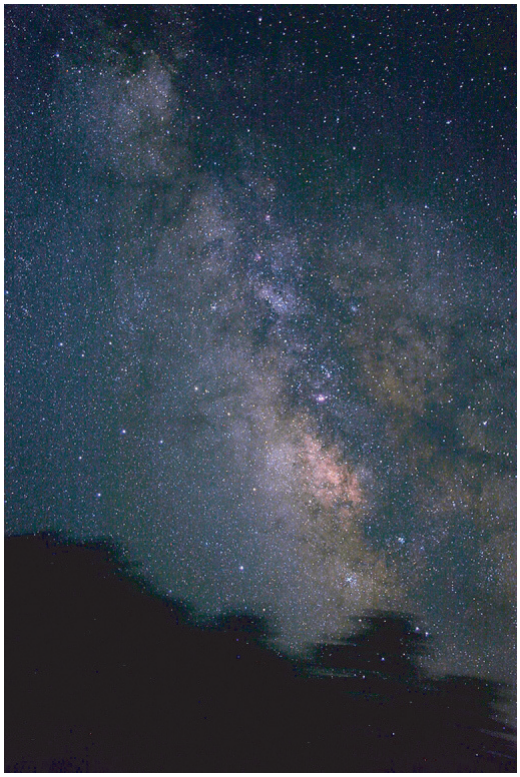
274 a Unités, Mesures et Constantes
Unités naturelles de Planck 277 • Autres systèmes d'unités 279 • Curiosités et défis amusants sur les unités 280 • Précision et exactitude des mesures 286 • Constantes physiques fondamentales 287 • Nombres utiles 292

294 Bibliographie

320 Indices et solutions des défis

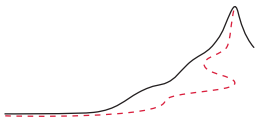
329 Crédits
Remerciements 329 • Crédits photographiques 330

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



La Relativité

Dans notre apprentissage du mouvement des objets,
l'aventure de la randonnée et d'autres expériences
nous conduisent à découvrir qu'il y a une vitesse maximale
dans la nature, et que deux événements
qui se produisent en même temps pour un observateur
peuvent ne pas l'être pour un autre.
Nous découvrons que l'espace vide peut se courber,
vibrer et s'agiter, nous constatons qu'il existe
une force maximale dans la nature, et nous comprenons
pourquoi nous pouvons contempler les étoiles.



Chapitre 1

VITESSE MAXIMALE, OBSERVATEURS AU REPOS ET MOUVEMENT DE LA LUMIÈRE

« Fama nihil est celerius*. »

La lumière est indispensable pour une description précise du mouvement. Une ligne ou une trajectoire donnée d'un mouvement est-elle droite ? Pour le savoir, nous devons l'inspecter sur toute sa longueur. En d'autres termes, nous faisons usage de la lumière pour définir la rectitude. Comment pouvons-nous décider qu'une surface est plane ? Nous l'inspectons sous tous les angles**, encore une fois en utilisant la lumière. Comment observons-nous le mouvement ? À l'aide de la lumière. Comment mesurons-nous une longueur avec une très grande précision ? Avec la lumière. Comment mesurons-nous le temps avec une très grande précision ? Avec la lumière : autrefois c'était la lumière du Soleil qui était utilisée, de nos jours c'est la lumière des atomes de césium.

Page 274

La lumière est primordiale parce qu'elle représente l'étalon de mesure pour le *mouvement non perturbé*. La physique aurait évolué beaucoup plus rapidement si, à une certaine époque reculée, la propagation de la lumière avait été reconnue comme étant l'exemple parfait du mouvement.

Mais la lumière est-elle réellement un phénomène lié au mouvement ? Ce problème était déjà soulevé dans la Grèce antique, à partir d'une simple réalité quotidienne : l'*ombre*. Les ombres démontrent que la lumière est une entité qui se déplace, émanant d'une source lumineuse, et avançant en lignes droites***. La conclusion évidente

* « Rien n'est plus rapide que la rumeur. » Cette citation familière est une version simplifiée de la sentence de Virgile : *fama, malum qua non aliud velocius ullum.* « La renommée, de tous les maux le plus véloce. » Tiré de *l'Énéide*, livre IV, vers 173 et 174.

** Remarquez qu'observer une surface plane sous tous les angles n'est pas suffisant pour cela : une surface qu'un rayon lumineux caresse tout le temps sur *toute* sa longueur dans toutes les directions n'est pas nécessairement plane. Pouvez-vous en donner un exemple ? Nous avons besoin d'autres méthodes pour vérifier la planéité à l'aide de la lumière. Pouvez-vous en citer une ?

Défi 2 s

*** À chaque fois qu'une source produit des ombres, les entités émises sont appelées *rayons* ou *rayonnements*. Excepté la lumière, d'autres exemples de rayonnements furent découverts par le truchement des ombres : les *rayons infrarouges* et les *rayons ultraviolets*, qui, avec la lumière visible, émanent de la plupart des sources lumineuses, et les *rayons cathodiques*, qui s'avérèrent être associés au mouvement d'une nouvelle particule, l'*électron*. Les ombres conduisirent également à la découverte des *rayons X*, qui se révélèrent être une nouvelle fois une variante de la lumière, dans le domaine des hautes fréquences. Les *rayons ionisants* furent aussi découverts via leurs ombres : ils sont constitués d'atomes ionisés en mouvement. Les trois variantes de la radioactivité, à savoir les *rayons* α (noyaux d'hélium), les *rayons* β (encore des électrons) et les *rayons* γ (rayons X de haute énergie) produisent également des ombres. Toutes ces découvertes furent réalisées entre 1890 et 1910 : ces années représentent la « période rayonnante » de la physique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

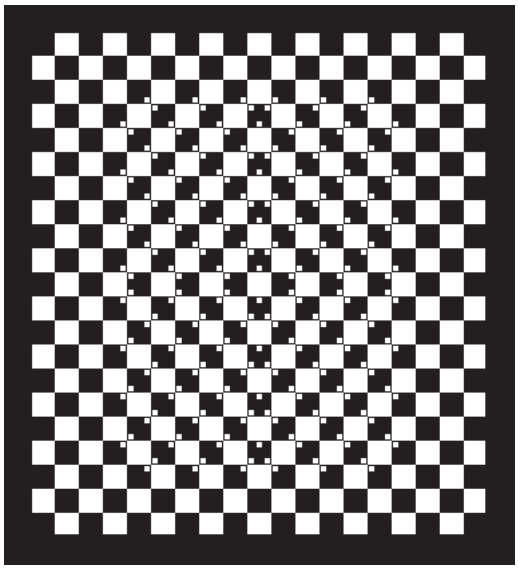


FIGURE 2 Comment vérifiez-vous si les lignes sont courbées ou droites ?

que la lumière met un certain temps pour voyager de la source jusqu'à la surface où
Réf. 1 l'ombre se manifeste avait déjà été formulée par le penseur grec Empédocle (v. 490 à v. 430 AV. J.-C.).

Nous pouvons confirmer ce résultat avec un autre argument plus subtil, mais toujours simple. La vitesse peut être mesurée. Donc la *vitesse parfaite*, qui est utilisée comme étalon implicite pour les mesures, doit posséder une valeur finie. Une vitesse standard infi-
Défi 3 s nie ne pourrait pas du tout permettre de réaliser des mesures. Dans la nature, les entités les plus légères se déplacent avec les vitesses les plus élevées. La lumière, qui est vraiment légère*, est un candidat tout désigné pour le mouvement à vitesse parfaite mais finie. Nous allons bientôt confirmer ce point.

Une vitesse finie pour la lumière signifie que tout ce que nous voyons représente une information issue du *passé*. Quand nous contemplons les astres, le Soleil ou notre chéri(e), nous voyons toujours une image du passé. Dans un sens, la nature nous empêche de profiter de l'instant présent – nous devons par conséquent apprendre à tirer profit du passé.

La vitesse de la lumière est élevée. C'est pour cela qu'elle ne fut pas mesurée avant 1676, bien que de nombreux savants, y compris Galilée, aient tenté en vain de le faire auparavant. La première méthode de mesure fut élaborée par l'astronome danois Ole
Page ?? Rømer** alors qu'il étudiait les orbites de Io et des autres satellites galiléens de Jupiter.

* L'auteur fait ici un jeu de mots : « Light, which is indeed light... », le mot *light* désigne à la fois la lumière et la légèreté. [N.D.T.]

** Ole Christensen Rømer (Aarhus 1644 – Copenhague 1710) était un astronome danois. Il fut le précepteur du Dauphin à Paris, à l'époque de Louis XIV. L'idée de la mesure de la vitesse de la lumière était due pour ainsi dire à l'astronome italien Giovanni Domenico Cassini, dont Rømer fut l'assistant. Rømer continua ses expériences de mesure jusqu'en 1681, date à laquelle il dut quitter la France, comme tous les protestants (de même que Christiaan Huygens), ainsi donc son œuvre fut interrompue. De retour au Danemark, un incendie ravagea toutes ses notes manuscrites concernant ses mesures. Par conséquent, il ne put continuer

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

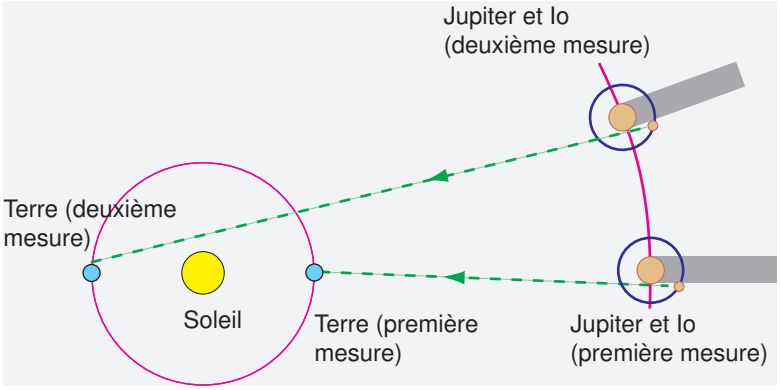


FIGURE 3 La méthode de Rømer pour mesurer la vitesse de la lumière.

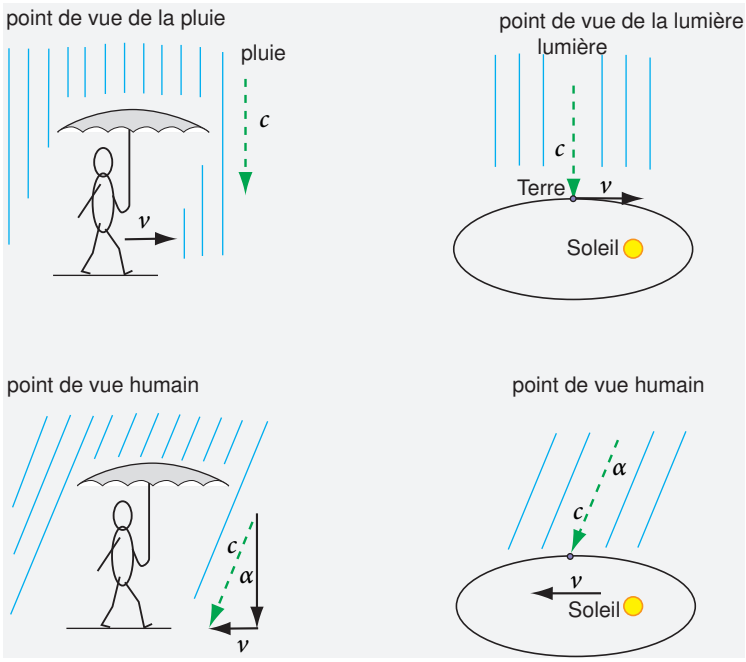


FIGURE 4 La méthode de la pluie pour mesurer la vitesse de la lumière.

Il obtint une grandeur incorrecte pour la vitesse de la lumière parce qu'il utilisait une valeur fausse pour leur distance à la Terre. Cependant, cela fut rapidement corrigé par ses pairs, notamment par Newton lui-même. Vous devriez pouvoir deviner sa méthode à partir de la Figure 3. Depuis cette époque, on savait que la lumière met un petit peu plus de 8 minutes pour voyager du Soleil à la Terre. Cela fut confirmé d'une manière élégante cinquante ans plus tard, en 1726, par l'astronome James Bradley. Étant anglais, Bradley songea à utiliser la « méthode de la pluie » pour évaluer la vitesse de la lumière.

Défi 4 s

Page 103

Réf. 2

Comment pouvons-nous mesurer la vitesse de la pluie qui tombe ? Nous marchons

à améliorer la précision de sa méthode. Plus tard, il devint un important dirigeant et réformateur de l'État danois.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

rapidement avec un parapluie, mesurons l'angle α sous lequel la pluie semble tomber, et enfin mesurons notre propre vitesse v. Comme indiqué sur la Figure 4, la vitesse c de la pluie est alors donnée par

$$c = v/\tan\alpha \,. \tag{1}$$

La même expérience peut être faite avec la lumière. Nous avons uniquement besoin de mesurer l'angle sous lequel la lumière provenant d'une étoile située au-dessus de l'orbite terrestre parvient à la Terre. Puisque la Terre est en mouvement par rapport au Soleil et donc par rapport à l'étoile, cet angle n'est pas droit. Cet effet est appelé l'*aberration* de la lumière, l'angle est plus facilement décelé en comparant les mesures réalisées à six mois d'intervalle. La valeur de cet angle est de 20,5″, de nos jours il peut être mesuré avec une précision atteignant cinq chiffres décimaux. Sachant que la vitesse de la Terre autour du Soleil est $v = 2\pi R/T = 29{,}7\,\mathrm{km/s}$, la vitesse de la lumière doit donc être $c = 3{,}00 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$*. C'est une valeur ahurissante, particulièrement lorsqu'elle est comparée à la vitesse la plus élevée jamais atteinte par un objet conçu par l'homme, à savoir les sondes Voyager, qui traversent l'espace à 52 Mm/h = 14 km/s, la croissance des enfants, environ 3 nm/s, ou la croissance des stalagmites dans les grottes, environ 0,3 pm/s. Nous commençons à comprendre pourquoi la mesure de la vitesse de la lumière est une science à part entière.

La première mesure *précise* de la vitesse de la lumière fut réalisée en 1849 par le physi-

* Les parapluies n'étaient pas courants en Grande-Bretagne en 1726, ils devinrent d'usage commun un peu plus tard, après avoir été introduits de Chine. La partie de l'histoire concernant le parapluie est inventée de toutes pièces. En réalité, Bradley eut son idée pendant qu'il naviguait sur la Tamise, lorsqu'il remarqua que, sur un navire en déplacement, le vent apparent avait une direction différente de celle qu'il avait sur la terre ferme. Il avait observé 50 étoiles durant de nombreuses années, particulièrement Gamma Draconis, et pendant ce temps il avait été intrigué par le *signe* de l'aberration, qui était *opposée* à l'effet qu'il était en train de vérifier, à savoir la parallaxe stellaire. Toutes deux, la parallaxe et l'aberration pour une étoile située au-dessus de l'écliptique, lui font décrire une petite ellipse au cours d'une année terrestre, bien que les sens de rotation soient différents. Pouvez-vous deviner pourquoi ?

Défi 5 s

Par ailleurs, il découle de la relativité restreinte que la formule (1) est fausse, et que la formule exacte est $c = v/\sin\alpha$: pouvez-vous voir pourquoi ?

Défi 6 s

Pour déterminer la vitesse de la Terre, nous devons d'abord préciser sa distance au Soleil. La méthode la plus simple est celle due au penseur grec Aristarque de Samos (v. 310 à v. 230 av. J.-C.). Nous mesurons l'angle entre la Lune et le Soleil à l'instant où la Lune est exactement à son premier ou dernier quartier. Le cosinus de cet angle fournit le rapport entre la distance à la Lune (déterminée, par exemple, par la méthode de la page 121) et la distance au Soleil. L'explication est laissée en exercice au lecteur.

Défi 7 s

L'angle en question est presque un angle droit (lequel produirait une valeur infinie pour la distance), et des instruments fiables sont nécessaires pour le mesurer avec précision, comme Hipparque l'avait remarqué dans une ample discussion sur ce problème autour de 130 av. J.-C. La mesure précise de l'angle ne devint réalisable qu'à la fin du dix-septième siècle, lorsqu'il fut établi qu'il valait 89,86°, fournissant un rapport de distance d'environ 400. Aujourd'hui, grâce aux mesures radar des planètes, la distance au Soleil est connue avec une précision invraisemblable de 30 mètres. Les variations de la distance de la Lune peuvent même être mesurées au centimètre près. Pouvez-vous deviner comment cela est réalisable ?

Réf. 3

Page 289

Défi 8 s

Aristarque détermina également les rayons du Soleil et de la Lune comme étant des multiples de celui de la Terre. Aristarque fut un savant exceptionnel : il fut le premier à proposer le système héliocentrique, et probablement le premier à proposer que les étoiles étaient d'autres soleils lointains. Pour ces idées, plusieurs de ses contemporains suggérèrent qu'il devait être condamné à mort pour impiété. Lorsque le moine et astronome polonais Nicolaus Copernicus (1473–1543) proposa à nouveau le système héliocentrique deux mille ans plus tard, il ne mentionna pas le nom d'Aristarque, même s'il tenait cette idée de lui.

Réf. 4

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

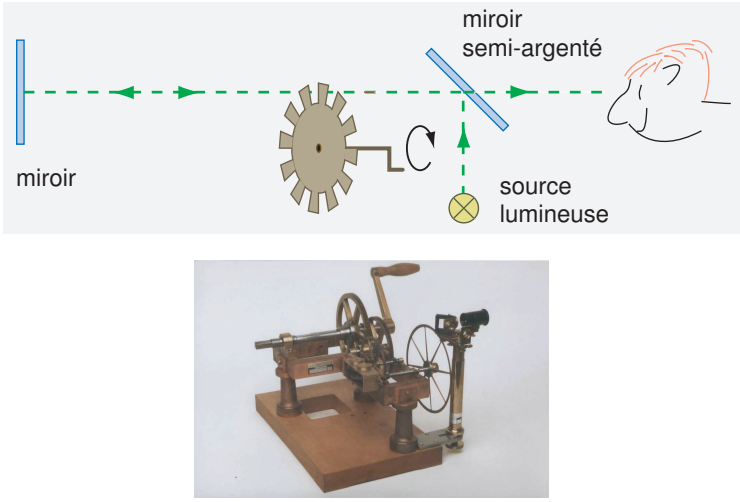


FIGURE 5 Dispositif de Fizeau permettant de mesurer la vitesse de la lumière. (© AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg)

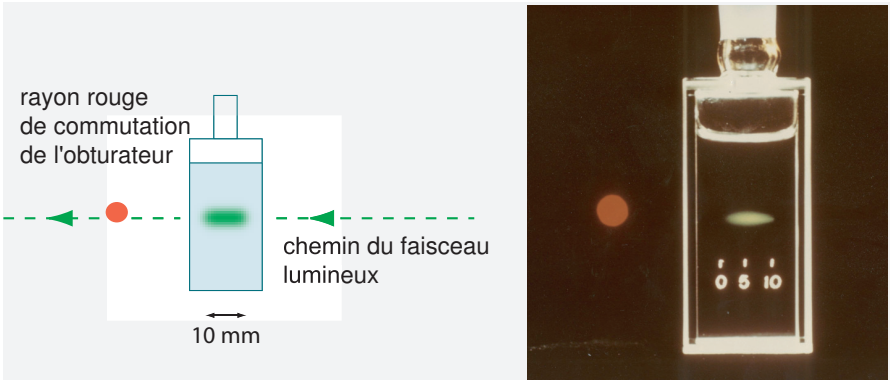


FIGURE 6 Photographie d'une pulsation lumineuse se déplaçant de la droite vers la gauche à travers une bouteille d'eau laiteuse, graduée en millimètres. (photographie © Tom Mattick)

cien français Hippolyte Fizeau (1819–1896). Par rapport à la valeur actuelle, la sienne n'était plus grande que de 5 % seulement. Il envoya un rayon lumineux en direction d'un miroir éloigné et mesura le temps que la lumière prit pour revenir. Comment Fizeau mesura-t-il ce temps sans l'aide d'aucun appareil électrique ? En réalité, il utilisa les
Page 49 mêmes principes que ceux qui sont utilisés pour mesurer les vitesses des munitions, la réponse est partiellement donnée dans la Figure 5. (À quelle distance le miroir devait-il
Défi 9 s être placé ?) Une reconstitution moderne de son expérience, réalisée par Jan Frercks, a
Réf. 5 atteint une précision de 2 %. Aujourd'hui l'expérience est beaucoup plus simple ; dans le chapitre sur l'électrodynamique, nous découvrirons comment mesurer la vitesse de la lumière en utilisant deux ordinateurs de mesure, tournant sous UNIX ou Linux et reliés
Page 28 par un câble.

La vitesse de la lumière est si élevée qu'il est même difficile de démontrer qu'elle est *finie*. Peut-être que la manière la plus élégante de prouver cela est matérialisée par la photographie d'une pulsation lumineuse traversant notre champ de vision, de la même

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

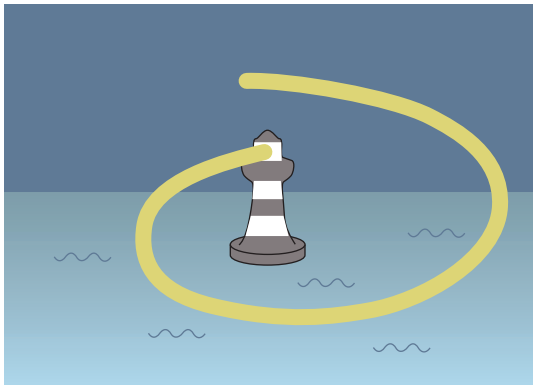


FIGURE 7 Une conséquence de la finitude de la vitesse de la lumière.

manière que nous pouvons photographier une voiture qui roule ou une balle de fusil qui
Réf. 6 traverse les airs. La Figure 6 montre la première photographie de ce type, produite en 1971 avec un appareil photographique reflex standard du marché, un obturateur ultra-rapide conçu par les photographes et, plus remarquablement, sans une seule pièce d'équipement
Défi 10 s électronique. (Quelle est la rapidité qu'un tel obturateur doit avoir ? Comment pourriez-vous construire un tel obturateur ? Et comment pourriez-vous vous assurer qu'il s'ouvre bien au bon instant ?)

Une vitesse finie pour la lumière implique aussi qu'un faisceau lumineux en rotation rapide se comporte comme indiqué sur la Figure 7. Dans la vie quotidienne, la vitesse élevée de la lumière et la rotation lente des phares rendent cet effet difficilement perceptible.

En résumé, la lumière se déplace extrêmement rapidement. Elle est beaucoup plus
Défi 11 s rapide que l'éclair, comme vous pourriez le vérifier vous-même. Un siècle de mesures de plus en plus précises de cette vitesse a mis au jour la valeur moderne

$$c = 299\,792\,458\,\mathrm{m/s}. \tag{2}$$

En fait, cette valeur est dorénavant fixée avec *exactitude*, par définition, et le mètre a été défini par rapport à c. Le Tableau 1 donne un aperçu de ce que nous savons aujourd'hui à propos du mouvement de la lumière. Deux propriétés étonnantes furent découvertes à
Réf. 7 la fin du dix-neuvième siècle. Elles constituent les fondements de la relativité restreinte.

POUVONS-NOUS JOUER AU TENNIS EN UTILISANT UNE PULSATION LASER EN GUISE DE BALLE ET DES MIROIRS COMME RAQUETTES ?

> « Et nihil est celerius annis*. »
>
> Ovide, *Les Métamorphoses.*

Nous savons tous qu'afin de lancer une pierre le plus loin possible nous devons courir au moment de la lancer. Nous savons instinctivement que dans ce cas précis la vitesse de la pierre par rapport au sol est plus élevée. Toutefois, au grand étonnement de tout

* « Rien n'est si prompt que la fuite des années. » Livre X, vers 520.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 1 Propriétés du mouvement de la lumière.

OBSERVATIONS SUR LA LUMIÈRE
La lumière peut se déplacer dans le vide.
La lumière transporte de l'énergie.
La lumière possède une quantité de mouvement : elle peut frapper des corps.
La lumière possède un moment cinétique : elle peut tourner autour des corps.
La lumière traverse de la lumière sans perturbation.
La lumière dans le vide se déplace toujours plus vite que n'importe quel corps matériel.
La vitesse de la lumière, sa véritable vitesse de signal, est la vitesse précurseur. Page 104
Dans le vide, sa valeur est de 299 792 458 m/s.
La vitesse propre de la lumière est infinie. Page 41
Les ombres peuvent se déplacer sans restriction sur leur vitesse.
La lumière se déplace en ligne droite lorsqu'elle se trouve loin de la matière.
La lumière de forte intensité est une onde.
Les rayons lumineux ne sont que des approximations lorsqu'on néglige la longueur d'onde.
Dans la matière, la vitesse de signal et la vitesse de l'énergie de la lumière sont inférieures à celle dans le vide.
Dans la matière, la vitesse de groupe des pulsations lumineuses peut être nulle, positive, négative ou infinie.

le monde, les expériences montrent que la lumière émise par une ampoule en mouvement possède la même vitesse que celle émise par une ampoule au repos. La lumière n'est jamais plus rapide que la lumière (dans le vide), tous les rayons lumineux possèdent la même vitesse. Nombre d'expériences spécialement conçues ont confirmé ce résultat avec une grande précision. La vitesse de la lumière peut être mesurée avec une précision meilleure que 1 m/s, malgré tout, pour des vitesses d'ampoules supérieures à 290 000 000 m/s, aucune différence n'a été relevée. (Pouvez-vous deviner quelles ampoules étaient utilisées ?)

Réf. 8

Défi 12 s

Dans la vie courante, nous savons qu'une pierre arrive plus rapidement si nous courons vers elle. À nouveau, pour la lumière aucune différence n'a été mesurée. Toutes les expériences montrent que la célérité de la lumière possède la *même valeur* pour tous les observateurs, même s'ils se déplacent les uns par rapport aux autres ou par rapport à la source lumineuse. La vitesse de la lumière est de ce fait la norme parfaite et idéale pour la mesure*.

* Une autre expression équivalente pour la vitesse de la lumière est la « vitesse radar » ou la « vitesse radio », nous verrons ci-dessous pourquoi elles s'appliquent également.

Page 80

De même, la vitesse de la lumière n'est pas très éloignée de celle des neutrinos. La démonstration la plus spectaculaire en fut faite par l'observation d'une supernova en 1987, lorsque le flash lumineux et la bouffée de neutrinos arrivèrent à 12 secondes d'intervalle l'un de l'autre. (Nous ne savons pas si l'écart est dû à des vitesses différentes ou à un point de départ différent, concernant les deux flashs.) Quel est le premier chiffre pour lequel les deux valeurs de vitesses pourraient différer, sachant que la supernova était située à $1,7 \cdot 10^5$ années-lumière ?

Défi 13 s

Des expériences montrent également que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions de l'espace, jusqu'à au moins 21 chiffres dans la précision. D'autres données, prises lors de sursauts de rayons

Réf. 9

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 8 Albert Einstein.

Réf. 11 Il existe un deuxième ensemble de pièces à conviction expérimentales pour la constance de la vitesse de la lumière. Chaque appareil électromagnétique, telle une brosse
Page 40 à dents électrique, montre que la vitesse de la lumière est constante. Nous découvrirons que les champs magnétiques ne pourraient être issus de courants électriques, comme ils le font chaque jour dans n'importe quel moteur et dans n'importe quel haut-parleur, si la vitesse de la lumière n'était pas constante. C'est effectivement de cette manière que cette constance fut déduite pour la première fois, par plusieurs chercheurs. Ce n'est qu'après avoir compris cela que le physicien suisse et allemand Albert Einstein* montra que cette constance est également en accord avec le mouvement des corps, comme nous le verrons dans cette section. La correspondance entre les brosses à dents électriques et la relativité
Page 40 sera décrite dans le chapitre sur l'électrodynamique. (Pour plus d'informations sur les conséquences directes de la relativité sur la conception des machines, lisez l'ouvrage inté-
Réf. 13 ressant de van Bladel.) En termes simples, si la vitesse de la lumière n'était pas constante, des observateurs seraient capables de se déplacer à cette vitesse. Puisque la lumière est

gamma, montrent que la vitesse de la lumière est indépendante de la fréquence, jusqu'à au moins 20 chiffres
Réf. 10 dans la précision.

* Albert Einstein (n. Ulm 1879 , d. Princeton 1955) fut un des plus grands physiciens ayant existé. Il publia trois articles fondamentaux en 1905, un concernant le mouvement brownien, un autre sur la relativité restreinte, et un à propos du concept de quanta de lumière. Chaque article était digne d'un prix Nobel, mais il reçu le prix uniquement pour le dernier de ceux-ci. C'est également en 1905 qu'il démontra la formule
Page 65 célébrissime $E_0 = mc^2$ (publiée au début de 1906), probablement stimulé par une idée de Olinto De Pretto. Bien qu'Einstein fût un des fondateurs de la théorie quantique, il se retourna plus tard contre celle-ci. Sa célèbre discussion avec son ami Niels Bohr a néanmoins permis d'éclaircir ce domaine dans ses aspects les plus déroutants. Il expliqua l'effet Einstein–de Haas qui démontrait que le magnétisme est dû à des mouvements à l'intérieur des matériaux. En 1915 et 1916, il publia son plus important accomplissement : la théorie générale de la relativité, une des réalisations les plus élégantes et extraordinaires de la science.

Étant juif et célèbre, Einstein constituait une cible favorite pour les attaques et la discrimination du mouvement national-socialiste (le parti nazi [N.D.T.]), et il émigra aux États-Unis en 1933. Il ne fut pas seulement
Réf. 12 un grand physicien, mais également un grand intellectuel ; son recueil de réflexions concernant des sujets extérieurs à la physique vaut la peine d'être lu.

Toute personne intéressée pour suivre les pas d'Einstein devrait savoir qu'il publia de nombreux articles, et que plusieurs d'entre eux étaient erronés. Il voulu alors corriger ses résultats dans des articles postérieurs, et il commit encore une fois des erreurs dans ceux-ci. Cela se produisait si fréquemment qu'il se tourna lui-même en dérision à ce propos. Einstein formula sa célèbre définition d'un génie comme étant une personne qui fait le plus grand nombre possible d'erreurs dans le temps le plus court possible.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

une onde, de tels observateurs pourraient observer une onde à l'arrêt. Cependant, l'électromagnétisme interdit de telles possibilités. Par conséquent, les observateurs ne peuvent pas atteindre la vitesse de la lumière.

En résumé, la vitesse v de n'importe quel système physique dans la nature (c'est-à-dire n'importe quelle masse ou énergie localisée) est limitée par

$$v \leqslant c \,. \tag{3}$$

Cette relation est à la base de la relativité restreinte. En réalité, la théorie complète de la relativité restreinte est contenue en elle. Einstein regrettait souvent que cette théorie fût baptisée « Relativitätstheorie » ou « théorie de la relativité », il aurait préféré le nom de « Invarianztheorie » ou « théorie de l'invariance », mais ne parvint pas à modifier
Réf. 14 l'appellation.

La constance de la vitesse de la lumière est en parfaite contradiction avec la mécanique galiléenne, et prouve que cette dernière est *fausse* aux vitesses élevées. À basse vitesse cette description demeure correcte, parce que l'erreur est imperceptible. Mais si nous désirons une description valide pour *toutes* les vitesses, nous devons mettre de côté la mécanique galiléenne. Par exemple, lorsque nous jouons au tennis, nous tirons profit du fait qu'en frappant la balle de la bonne façon nous pouvons augmenter ou diminuer sa vitesse. Mais avec la lumière c'est impossible. Même si nous prenons un avion et poursuivons un rayon lumineux, celui-ci s'éloignera toujours de nous avec la même vitesse. La lumière ne se comporte pas comme les véhicules. Si nous accélérons un autobus que nous sommes en train de conduire, les voitures de l'autre côté de la route passent avec des vitesses de plus en plus élevées. Pour la lumière, il n'en est *pas* ainsi : elle nous frôle toujours avec la *même* vitesse*.

Pourquoi ce résultat paraît-il presque incroyable, alors que les mesures le démontrent sans ambiguïté ? Prenez deux observateurs O et Ω (prononcez « oméga ») se déplaçant avec une vitesse relative v, comme deux voitures sur des voies opposées dans la rue. Imaginez qu'à l'instant où ils passent l'un près de l'autre, un flash lumineux est émis par une ampoule en O. Ce flash lumineux se déplace le long des positions $x(t)$ pour O et le long des positions $\xi(\tau)$ (prononcez « xi de tau ») pour Ω. Puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les deux, nous avons

$$\frac{x}{t} = c = \frac{\xi}{\tau} \,. \tag{4}$$

Cependant, dans la situation décrite, nous avons évidemment $x \neq \xi$. En d'autres termes, la constance de la vitesse de la lumière implique que $t \neq \tau$, c'est-à-dire que *le temps est différent pour des observateurs se déplaçant relativement l'un par rapport à l'autre*. Le
Défi 14 e temps n'est donc pas unique. Ce résultat déconcertant, qui a été confirmé expérimenta-
Réf. 15 lement à de nombreuses reprises, fut formulé clairement pour la première fois en 1905 par Albert Einstein. Bien que beaucoup de personnes aient eu connaissance de l'invariance de c, seul le jeune Einstein eut l'audace d'affirmer que le temps est dépendant de

* En réalité, même avec la précision actuelle des mesures de $2 \cdot 10^{-13}$, nous ne pouvons discerner une quel-
Réf. 9 conque variation de la vitesse de la lumière avec la vitesse de l'observateur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

l'observateur, et d'en affronter les conséquences. Faisons-en autant.

Déjà en 1895, le débat sur le point de vue concernant cette invariance avait été baptisé *théorie de la relativité* par Henri Poincaré*. Einstein dénomma la description du mouvement sans la gravitation la théorie de la *relativité restreinte*, et la description du mouvement incluant la gravitation, la théorie de la *relativité générale*. Ces deux domaines sont pleins de résultats fascinants qui défient l'intuition. En particulier, ils montrent que la physique galiléenne, qui est valable dans la vie quotidienne, est fausse aux vitesses élevées.

Réf. 11

La vitesse de la lumière est une vitesse limite. Nous insistons sur le fait que nous ne parlons pas de la situation où une particule se déplace plus rapidement que la lumière *dans la matière*, mais plutôt où elle est plus lente que la vitesse de la lumière *dans le vide*. Se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière dans la matière est possible. Si la particule est chargée, cette situation donne naissance au *rayonnement Čerenkov*. Il est l'analogue de l'onde en forme de V générée par un bateau à moteur sur la mer ou de l'onde de choc en forme de cône autour d'un avion qui brise le mur du son. Le rayonnement Čerenkov est fréquemment observé, par exemple il est la cause de la couleur bleue de l'eau dans les réacteurs nucléaires. À ce propos, la vitesse de la lumière dans la matière peut être très lente : au centre du Soleil, elle est estimée à approximativement 10 km/an seulement, et, dans certains matériaux, on la mesure même en laboratoire comme étant aussi petite que 0,3 m/s. Par la suite, lorsque nous mentionnerons l'expression « vitesse de la lumière », nous voudrons sous-entendre qu'il s'agit de la vitesse de la lumière dans le vide. La vitesse de la lumière dans l'air est inférieure, d'une fraction de pourcentage seulement, à celle dans le vide, ainsi donc dans la plupart des cas la différence peut être négligée.

Réf. 18, Réf. 19

La relativité restreinte en quelques lignes

La vitesse de la lumière est constante pour tous les observateurs. Nous pouvons ainsi, à l'aide de la Figure 9, déduire toutes les relations entre ce que deux observateurs distincts mesurent. Elle montre deux observateurs se déplaçant avec une vitesse constante l'un par rapport à l'autre dans l'espace-temps, où le premier d'entre eux envoie un signal lumineux vers le second, à partir duquel il est réfléchi en direction du premier. Puisque la vitesse de la lumière est constante, la lumière est le seul outil permettant de comparer les coordonnées d'espace et de temps de deux observateurs éloignés. Deux horloges éloignées (comme deux bâtons éloignés d'un mètre) ne peuvent être comparées, ou synchronisées, qu'en utilisant la lumière ou des signaux radio. Puisque la vitesse de la lumière est constante, les trajets lumineux (émis dans une direction donnée) sont parallèles dans de tels diagrammes.

Réf. 20

Une vitesse relative constante entre deux observateurs implique qu'un facteur k constant relie les coordonnées de temps des événements. (Pourquoi cette relation est-elle linéaire ?) Si un signal lumineux part à l'instant T selon l'horloge du premier observa-

Défi 15 s

* Henri Poincaré (1854–1912) fut un grand physicien et mathématicien français. Il fut un des hommes les plus prolifiques de son époque, faisant progresser la relativité, la théorie quantique et de nombreuses disciplines des mathématiques.

L'introduction la plus admirable et la plus élémentaire à la relativité reste celle donnée par Albert Einstein lui-même, par exemple dans *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Vieweg, 1997, ou dans *The Meaning of Relativity*, Methuen, London, 1951. Il a fallu un siècle pour que des ouvrages presque aussi ma-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

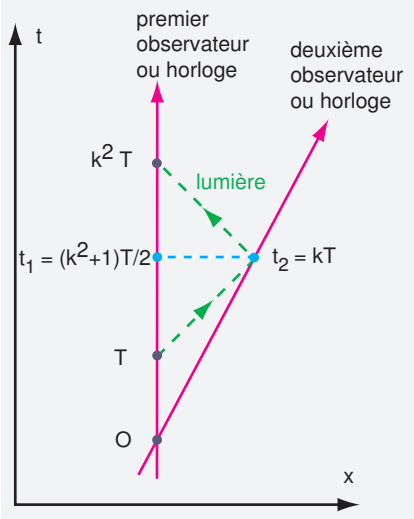


FIGURE 9 Un dessin contenant l'essentiel de la relativité restreinte.

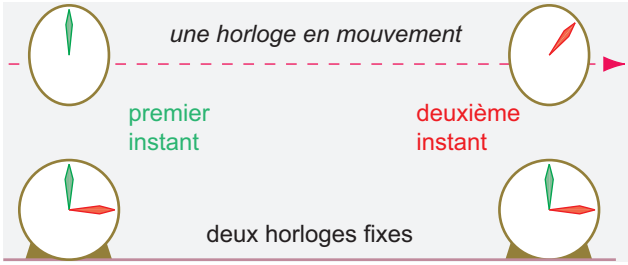


FIGURE 10 Des horloges en mouvement avancent lentement.

teur, il parvient au second à l'instant kT, et alors revient au premier au temps k^2T. Le Défi 16 s dessin montre que

$$k = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \quad \text{ou} \quad \frac{v}{c} = \frac{k^2-1}{k^2+1} \,. \tag{5}$$

Page 26 Ce facteur apparaîtra à nouveau dans l'effet Doppler*.

La figure montre également que la coordonnée de temps t_1 attribuée par le premier observateur à l'instant auquel la lumière est réfléchie est différente de la coordonnée t_2 attribuée par le deuxième observateur. Le temps est en fait différent pour deux observateurs en mouvement relatif. La Figure 10 illustre cette conséquence.

Le *facteur de dilatation du temps* entre les deux coordonnées de temps est déduit de la Figure 9 en comparant les valeurs de t_1 et t_2 ; il est donné par

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(v) \,. \tag{6}$$

Réf. 16, Réf. 17 gnifiques paraissent, tel que celui de Taylor et Wheeler.

* L'explication de la relativité qui utilise ce facteur k est souvent appelée le *k-calculus*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les intervalles de temps pour un observateur en mouvement sont *raccourcis* de ce facteur γ, le facteur de dilatation du temps est toujours plus grand que 1. Dit autrement, *les horloges en mouvement avancent plus lentement*. Pour les vitesses de la vie courante l'effet est
Défi 17 e imperceptible. C'est pourquoi nous ne décelons pas d'écarts de durées dans la vie quotidienne. Néanmoins, la physique galiléenne n'est pas correcte pour des vitesses proches de celle de la lumière. Le même facteur γ apparaît aussi dans la formule $E = \gamma mc^2$, que nous déduirons ci-dessous. L'expression (5) ou (6) représente le seul bagage mathématique nécessaire en relativité restreinte : tous les autres résultats en dérivent.

Si un signal lumineux est envoyé à partir du second observateur et est réfléchi, celui-ci formulera la même conclusion : pour lui, la première horloge se déplace, et, toujours pour lui, l'horloge en mouvement avance plus lentement. *Chacun des observateurs remarque que l'autre horloge avance plus lentement*. La situation est semblable à celle de deux hommes comparant le nombre d'échelons entre deux échelles identiques qui ne sont pas parallèles. Un homme sur l'une des échelles observera toujours que les échelons de l'*autre* échelle sont plus courts. Pour emprunter une autre analogie, prenez deux individus s'éloignant l'un de l'autre : chacun d'entre eux remarque que l'autre devient de plus en plus petit au fur et à mesure que la distance augmente.

Naturellement, beaucoup de gens ont tenté de trouver des arguments pour contourner cette étrange conséquence qui veut que le temps soit différent d'un observateur à l'autre. Mais personne n'a réussi, et les résultats expérimentaux confirment cette conclusion. Jetons un œil sur certains d'entre eux.

Accélération de la lumière et effet Doppler

La lumière *peut* être accélérée. N'importe quel miroir réalise cela ! Nous verrons dans le chapitre sur l'électromagnétisme que la matière a aussi le pouvoir de *courber* la lumière,
Page 86 et donc de l'accélérer. Toutefois, il ressortira que toutes ces méthodes modifient uniquement la *direction* de propagation, aucune d'entre elles ne possède l'aptitude à modifier la *vitesse* de la lumière dans le vide. En résumé, la lumière est un exemple d'un mouvement qui ne peut pas être stoppé. Il existe seulement quelques autres exemples. Pouvez-vous
Défi 18 s en citer un ?

Que se passerait-il si nous pouvions accélérer la lumière à des vitesses plus importantes ? Pour que cela soit possible, la lumière devrait être constituée de particules ayant une masse non nulle. Les physiciens nomment de telles particules des particules *massives*. Si la lumière avait une masse, il serait nécessaire de distinguer la « vitesse de l'énergie sans masse » c de la vitesse de la lumière c_L, qui serait plus petite et qui dépendrait de l'énergie cinétique de ces particules massives. La vitesse de la lumière ne serait pas constante, mais la vitesse de l'énergie sans masse le serait toujours. Les particules massives de lumière pourraient être capturées, immobilisées et stockées dans une boîte. De telles boîtes rendraient l'éclairage électrique inutile, elles seraient suffisantes pour emmagasiner une certaine quantité de lumière du jour à l'intérieur et pour la relâcher, lentement, pendant la nuit suivante, peut-être après lui avoir communiqué une impulsion pour l'accélérer*.

* A ce propos, la lumière massive aurait également des modes de polarisation *longitudinale*. C'est en contradiction avec les observations, qui démontrent que la lumière est polarisée exclusivement *transversalement* à la direction de propagation.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

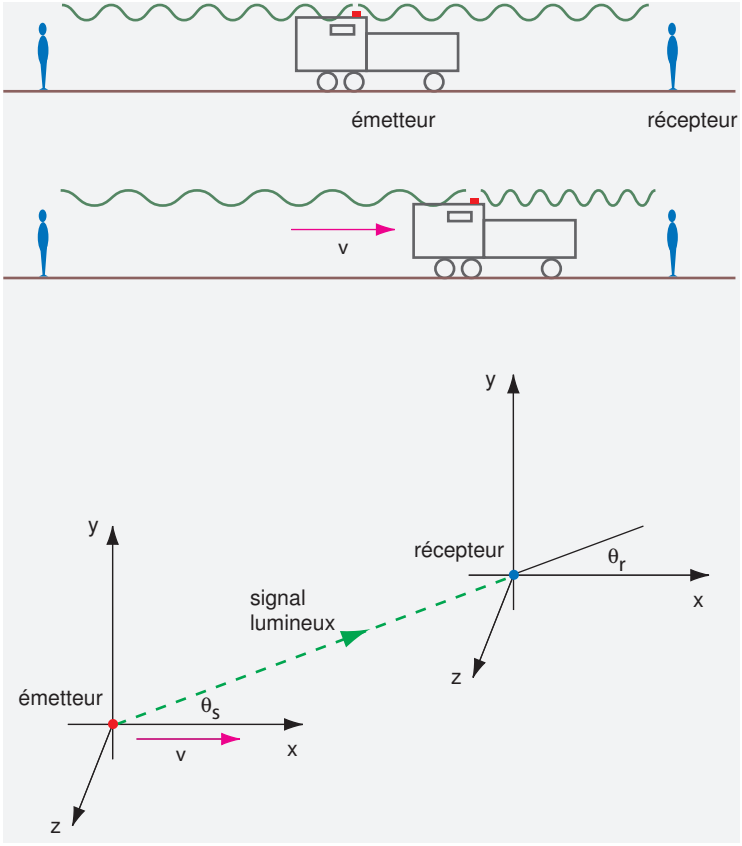


FIGURE 11 Le dispositif permettant l'observation de l'effet Doppler.

Réf. 21, Réf. 22

Les physiciens ont testé l'éventualité de l'existence de la lumière massive avec suffisamment de précision. Les observations délimitent maintenant toute (particule de) lumière massive possible à moins de $1{,}3 \cdot 10^{-52}$ kg à partir des expériences réalisées sur Terre, et à moins de $4 \cdot 10^{-62}$ kg à partir d'arguments astrophysiques (lesquels sont un brin moins solides). En d'autres termes, la lumière n'a pas de poids, la lumière reste la lumière.

Mais que se passe-t-il lorsque de la lumière frappe un miroir *en mouvement* ? Si la vitesse de la lumière ne varie pas, quelque chose d'autre doit le faire. Cette situation est semblable à celle d'une source lumineuse en mouvement par rapport au récepteur : celui-ci observera une *couleur différente* de celle observée par l'émetteur. C'est l'*effet Doppler*. Christian Doppler* fut le premier à étudier le décalage en fréquence dans le cas des ondes sonores – le changement bien connu dans la tonalité du sifflement entre des trains s'approchant et s'éloignant – et à extrapoler ce concept au cas des ondes lumineuses. Comme nous le verrons plus tard, la lumière est (aussi) une onde, et sa couleur est déterminée par sa fréquence ou, de manière équivalente, par sa longueur d'onde λ. Comme la tonalité

* Christian Andreas Doppler (n. Salzbourg 1803, d. Venise 1853) était un physicien autrichien. Doppler étudia l'effet qui porte son nom pour le son et la lumière. En 1842, il prédit (correctement) qu'un jour nous serions capables de tirer profit de cet effet pour mesurer le mouvement des astres éloignés en observant leurs couleurs.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

qui change pour des trains en mouvement, Doppler comprit qu'une source lumineuse en mouvement entraîne que la couleur qui est perçue par le récepteur est différente de la couleur émise à la source. Un raisonnement géométrique élémentaire, et la conservation
Défi 19 e du nombre de maxima et minima, conduit au résultat

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_s} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\left(1 - \frac{v}{c}\cos\theta_r\right) = \gamma\left(1 - \frac{v}{c}\cos\theta_r\right) . \tag{7}$$

Dans cette expression, les variables v et θ_r sont définies sur la Figure 11. La lumière d'une source qui s'approche est ainsi décalée vers le bleu, tandis que celle d'une source qui s'éloigne est décalée vers le rouge. La première observation de l'effet Doppler pour la lumière fut réalisée par Johannes Stark* en 1905, en étudiant la lumière émise par des atomes en mouvement. Toutes les expériences postérieures ont confirmé le décalage en couleur calculé, dans les limites des erreurs de mesure. Les dernières vérifications ont
Réf. 23 trouvé un accord à deux parties près par million. Au contraire des ondes sonores, un changement de couleur est également relevé lorsque le mouvement est *transversal* par rapport au signal lumineux. Donc, une baguette jaune en mouvement rapide à travers le champ de vision aura un bord d'attaque bleu et un bord de fuite rouge avant qu'il se trouve au point le plus proche de l'observateur. Les couleurs résultent d'une combinaison du décalage Doppler longitudinal (du premier ordre) et du décalage Doppler transversal (du second ordre). À un angle particulier $\theta_{\text{non décalé}}$ les couleurs demeureront identiques. (Comment le décalage en longueur d'onde apparaîtra-t-il dans le cas
Défi 20 s purement transversal ? Quelle est l'expression de $\theta_{\text{non décalé}}$ par rapport à v ?)

Le décalage de couleur est utilisé dans de nombreuses applications. Presque tous les corps solides sont des miroirs pour les ondes radio. De nombreux immeubles possèdent des portes qui s'ouvrent automatiquement quand nous nous en approchons. Un minuscule capteur situé au-dessus de la porte détecte l'arrivée d'une personne. Il le fait généralement en mesurant l'effet Doppler des ondes radio qu'il émet et qui sont réfléchies
Page 80 par la personne qui approche. (Nous verrons plus tard que les ondes radio et la lumière sont deux manifestations du même phénomène.) Donc les portes s'ouvrent à chaque fois que quelque chose s'avance vers elles. Le radar de la gendarmerie utilise également l'effet Doppler, cette fois pour mesurer la vitesse des véhicules**.

L'effet Doppler permet également de mesurer la vitesse des sources lumineuses. En fait, il est communément utilisé pour évaluer la vitesse des astres lointains. Dans ces situations, le décalage Doppler est souvent caractérisé par la variable z du *décalage vers*

* Johannes Stark (1874–1957) découvrit en 1905 l'effet Doppler optique dans les rayons ionisants et, en 1913, l'éclatement et le décalage de raies spectrales dans des champs électriques, que nous appelons aujourd'hui effet Stark. Pour ces deux découvertes il reçut en 1919 le prix Nobel de physique. Il quitta sa chaire de professeur en 1922 et devint un peu plus tard un fervent nazi. En tant que membre du parti nazi à partir de 1930, il fut reconnu pour ses critiques hostiles des déclarations des autres personnes sur la nature, uniquement pour des raisons idéologiques. Il fut ensuite méprisé à juste titre par la communauté académique partout dans le monde.

Défi 21 s ** À quelle vitesse un feu de signalisation rouge apparaît-il comme étant vert ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

le rouge, définie à l'aide de la longueur d'onde λ ou de la fréquence f par

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_R} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1 \,. \tag{8}$$

Défi 22 s Pouvez-vous imaginer comment le nombre z est déterminé ? Les valeurs caractéristiques de z pour des sources lumineuses situées dans le ciel s'échelonnent de $-0,1$ à $3,5$, mais des valeurs plus élevées, allant jusqu'à plus de 10, ont aussi été relevées. Pouvez-vous Défi 23 s déterminer les vitesses correspondantes ? Pourquoi peuvent-elles être si élevées ?

En résumé, à chaque fois que nous tentons de modifier la *vitesse* de la lumière, nous ne parvenons en fait qu'à modifier sa *couleur*. C'est l'effet Doppler.

Page 139 Nous savons grâce à la physique classique que, lorsque de la lumière frôle une masse importante telle qu'une étoile, elle est déviée. Est-ce que cette déviation conduit à un Défi 24 s décalage Doppler ?

La différence entre la lumière et le son

L'effet Doppler pour la lumière est beaucoup plus important que l'effet Doppler pour le son. Même si l'on ne savait pas encore que la vitesse de la lumière est constante, cet effet à lui tout seul *prouverait* que le temps est différent pour des observateurs en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Pourquoi ? Le temps est ce que nous lisons sur notre montre. Afin de déterminer si une autre montre est synchronisée avec la nôtre, nous regardons les deux montres à la fois. En bref, nous avons besoin d'utiliser des signaux Réf. 24 lumineux pour synchroniser des horloges. Maintenant, toute variation dans la couleur de la lumière se déplaçant d'un observateur à un autre implique nécessairement que leurs montres avancent différemment, et donc que le temps est *différent* pour chacun d'entre eux. Une autre façon de voir cela est de remarquer qu'une source lumineuse est aussi une horloge – égrenant très rapidement ses « tic-tac ». Donc si deux observateurs voient des couleurs différentes à partir de la même source, ils mesurent des nombres différents d'oscillations pour la même horloge. En d'autres termes, le temps est différent pour des observateurs se déplaçant l'un par rapport à l'autre. En réalité, l'équation (5) implique que la relativité découle pleinement de l'effet Doppler pour la lumière. (Pouvez-vous confirmer que la relation entre des fréquences dépendant de l'observateur et le temps Défi 25 s dépendant de l'observateur n'est pas vérifiée dans le cas de l'effet Doppler pour le *son* ?)

Pourquoi le comportement de la lumière implique-t-il la relativité restreinte, alors que celui du son dans l'air ne le fait pas ? La réponse est que la lumière est une limite pour le mouvement de l'énergie. L'expérience montre qu'il existe des avions supersoniques, mais qu'il n'y a pas de fusées supraluminiques. En d'autres termes, la limite $v \leqslant c$ est valide uniquement si c représente la vitesse de la lumière, et non si c est la vitesse du son dans l'air.

Malgré tout, il existe au moins un système dans la nature pour lequel la vitesse du son est en fait une vitesse limite pour l'énergie : la vitesse du son est la vitesse limite pour le mouvement des *dislocations* dans les solides cristallins. (Nous discuterons de ce détail Page ?? plus loin.) Par conséquent, la théorie de la relativité restreinte est également valide pour de telles dislocations, entraînant ainsi que la vitesse de la lumière est remplacée à chaque fois par la vitesse du son ! Les dislocations vérifient les transformations de Lorentz, mon-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

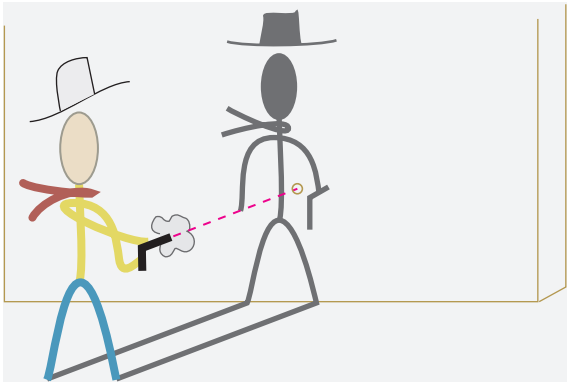


FIGURE 12 Lucky Luke.

Réf. 25 trant la contraction des longueurs et obéissant à la célèbre formule de l'énergie $E = \gamma mc^2$. Dans tous ces effets, la vitesse du son c joue le même rôle pour les dislocations que la vitesse de la lumière pour les systèmes physiques en général.

Si la relativité restreinte est fondée sur l'hypothèse que rien ne peut voyager plus vite que la lumière, alors ce postulat doit être soigneusement vérifié.

POUVONS-NOUS TIRER PLUS VITE QUE NOTRE OMBRE ?

« Quid celerius umbra ?* »

Pour que Lucky Luke puisse accomplir l'exploit de la Figure 12, sa balle de revolver
Défi 26 e doit voyager plus vite que la vitesse de la lumière. (Qu'en est-il de sa main ?) Afin d'imiter Lucky Luke, nous pourrions emprunter la plus grande quantité utile d'énergie disponible, en la prélevant directement d'une centrale électrique, et accélérer les « balles » les plus légères qui puissent être manipulées, à savoir les électrons. Cette expérience est exécutée chaque jour dans des accélérateurs de particules tels que l'anneau du Large Electron Positron, le LEP, de 27 km de circonférence, situé pour partie en France et pour partie en Suisse, près de Genève. Là, 40 MW de puissance électrique (la même quantité que celle consommée par une petite ville) accélèrent des électrons et des positrons à des
Réf. 26 énergies gigantesques de 16 nJ (104,5 GeV) chacun, et leur vitesse est mesurée. Le résultat est indiqué sur la Figure 13 : même avec ces moyens impressionnants, il est impossible de faire voyager des électrons plus vite que la lumière. (Pouvez-vous imaginer une ma-
Défi 27 e nière de mesurer l'énergie et la vitesse séparément ?) La relation vitesse–énergie de la
Page 59 Figure 13 est une conséquence de la vitesse maximale, et elle sera déduite plus loin. Cela, ainsi que de nombreuses observations similaires, montre donc qu'il existe une *limite* à la vitesse des objets. Des corps (et du rayonnement) ne peuvent pas se déplacer à des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière**. L'exactitude de la mécanique galiléenne

* « Qu'est-ce qui est plus rapide que l'ombre ? » Une devise souvent rencontrée sur les cadrans solaires.

** Il y a toujours des gens qui refusent d'accepter ces résultats, de même que la théorie de la relativité qui en découle. Chaque physicien devrait prendre plaisir à participer, au moins une fois dans sa vie, à une conversation avec l'une de ces personnes. (Étrangement, aucune femme n'a été signalée comme faisant partie de ce groupe d'individus.) Cette expérience peut être faite, par exemple, sur Internet, dans le forum de discussion

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

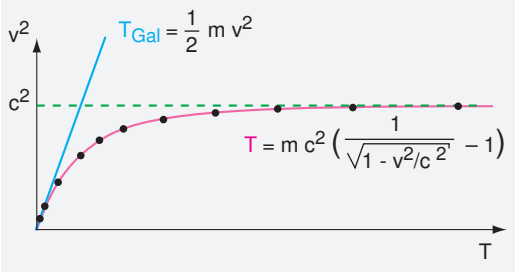


FIGURE 13 Valeurs expérimentales (points) pour la vitesse v des électrons en fonction de leur énergie cinétique T, comparée à la prédiction de la physique galiléenne (bleu) et à celle de la relativité restreinte (rouge).

fut considérée comme étant normale durant plus de trois siècles, de telle façon que personne n'avait songé à la mettre en défaut, mais lorsque ce fut finalement le cas, comme dans la Figure 13, elle se révéla fausse.

Les gens les plus frustrés par cette limite sont les ingénieurs en informatique : si la vitesse de la lumière était plus élevée, il serait possible de concevoir des microprocesseurs plus rapides et donc des ordinateurs plus puissants, ce qui permettrait, par exemple, des progrès plus rapides dans la construction d'ordinateurs qui assimilent et utilisent notre langue.

L'existence d'une vitesse limite s'oppose à la mécanique galiléenne. En réalité, elle signifie que, pour des vitesses proches de celle de la lumière, disons environ 15 000 km/s ou plus, l'expression $mv^2/2$ n'est *plus* égale à l'énergie cinétique T de la particule. En fait, de telles vitesses élevées sont plutôt courantes : de nombreuses familles en trouvent un exemple dans leur foyer. Calculez tout simplement la vitesse des électrons à l'intérieur d'un poste de télévision, étant donné que le transformateur électrique intégré génère 30 kV.

Défi 28 s

L'observation de la vitesse de la lumière comme une vitesse *limite* pour les objets est facilement comprise comme étant une conséquence de son *invariance*. Des corps qui peuvent être au repos dans un référentiel donné se déplacent évidemment plus lentement que la vitesse maximale (de la lumière) dans ce référentiel. Maintenant, si quelque chose se déplace plus lentement qu'autre chose, pour *un* observateur, il en sera également de même pour tous les autres observateurs. (Essayer d'imaginer un monde dans lequel cela ne serait pas le cas est intéressant : des choses amusantes se produiraient, par exemple des corps s'interpénétrant les uns les autres.) Puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, aucun objet ne peut se déplacer plus vite que la lumière, pour tous les observateurs.

Défi 29 d

Nous comprenons que la vitesse maximale est la vitesse des entités *dénuées de masse*. Les ondes électromagnétiques, incluant la lumière, sont les seules entités connues qui peuvent voyager à la vitesse maximale. Les ondes gravitationnelles aussi sont présumées atteindre cette vitesse. Bien que la vitesse des neutrinos ne puisse pas être distinguée expérimentalement de la vitesse maximale, des expériences récentes suggèrent qu'ils doivent posséder une masse minuscule.

Réf. 28

Réf. 27 sci.physics.relativity. Voyez aussi le site Web http://www.crank.net. Ces cinglés sont des personnages fascinants, surtout parce qu'ils enseignent l'importance de la *précision* dans le langage et dans le raisonnement, ce qu'ils négligent tous, sans aucune exception. Des rencontres avec plusieurs d'entre eux ont été une source d'inspiration pour ce chapitre.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

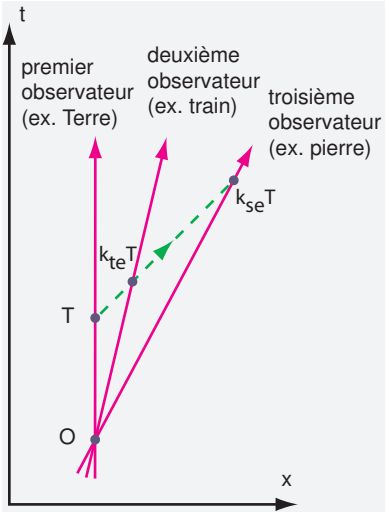


FIGURE 14 Comment déduire la composition des vitesses.

Inversement, si un phénomène existe dont la vitesse est la vitesse limite pour un observateur, alors cette vitesse limite doit nécessairement être la même pour tous les observateurs. La relation entre la propriété de vitesse limite et l'invariance selon l'observateur est-elle valide en général dans la nature ?

Défi 30 e
Défi 31 r

La composition des vitesses

Si la vitesse de la lumière est une limite, aucune tentative pour la dépasser ne peut aboutir. Cela implique que, lorsque des vitesses sont composées, comme lorsque nous jetons une pierre tout en courant, les valeurs ne peuvent pas être simplement additionnées. Si un train roule à la vitesse v_{tT} par rapport à la Terre, et que quelqu'un jette une pierre à l'intérieur de celui-ci avec une vitesse v_{pt} par rapport au train dans la même direction, il est généralement présumé comme évident que la vitesse de la pierre relativement à la Terre est donnée par $v_{pT} = v_{pt} + v_{tT}$. En réalité, le raisonnement et les mesures indiquent chacun un résultat différent.

L'existence d'une vitesse maximale, juxtaposée à la Figure 14, implique que les facteurs k doivent vérifier $k_{pT} = k_{pt}k_{tT}$*. Alors, nous avons juste à insérer la relation (5) entre chaque facteur k et la vitesse respective, pour obtenir

Défi 32 e

$$v_{pT} = \frac{v_{pt} + v_{tT}}{1 + v_{pt}v_{tT}/c^2} \,. \tag{9}$$

Celle-ci est appelée *formule de la composition des vitesses*. Le résultat n'est jamais supérieur à c et est toujours inférieur à l'addition naïve des vitesses**. L'expression (9) a été confirmée par chacune des millions de situations dans lesquelles elle a été contrôlée. Vous devez vérifier qu'elle se réduit à l'addition naïve pour les valeurs de la vie quotidienne.

Défi 33 e
Page 59, page 40
Réf. 22

* En prenant le logarithme (népérien) de cette équation, nous pouvons définir une quantité, la *rapidité*, qui

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les observateurs et le principe de relativité restreinte

La relativité restreinte est fondée sur un principe élémentaire :

▷ *La vitesse maximale du transport de l'énergie est la même pour tous les observateurs.*

Réf. 30 Ou, comme Hendrik Lorentz* préférait le dire, par l'équivalent :

▷ *La vitesse v d'un système physique est limitée par*

$$v \leqslant c \tag{10}$$

pour tous les observateurs, où c est la vitesse de la lumière.

Cette indépendance de la vitesse de la lumière par rapport à l'observateur fut vérifiée Réf. 31 avec une grande précision par Michelson et Morley** en 1887 et les années suivantes. Elle a été confirmée dans toutes les expériences qui ont suivi ; la plus précise à ce jour, Réf. 32 qui a atteint une précision de 10^{-14}, est indiquée dans la Figure 15.

En réalité, la relativité restreinte est également confirmée par toutes les expériences de précision qui furent réalisées *avant* qu'elle ait été formulée. Vous pouvez même la vérifier chez vous. La manière de le faire est indiquée dans la section concernant Page 40 l'électrodynamique.

L'existence d'une vitesse limite possède plusieurs conséquences intéressantes. Pour les explorer, laissons le reste de la physique galiléenne telle quelle***. La vitesse limite est la vitesse de la lumière. Elle est constante pour tous les observateurs. Cette invariance implique que :

---

mesure la vitesse et qui est additive.

Réf. 29 ** Nous pouvons également déduire les transformations de Lorentz directement de cette expression.

* Hendrik Antoon Lorentz (n. Arnhem 1853, d. Haarlem 1928) fut, avec Boltzmann et Kelvin, un des physiciens les plus importants de son époque. Il déduisit ce que l'on appelle les transformations de Lorentz et la contraction de Lorentz à partir de l'équation de Maxwell pour le champ électrodynamique. Il fut le premier à comprendre, bien avant que la théorie quantique ne confirme cette idée, que les équations de Maxwell pour le vide décrivent aussi la matière et toutes ses propriétés, à partir du moment où des particules ponctuelles chargées en mouvement – les électrons – sont incluses. Il montra cela en particulier pour la dispersion de la lumière, pour l'effet Zeeman, pour l'effet Hall et pour l'effet Faraday. Il formula la description correcte de la force de Lorentz. En 1902, il reçut le prix Nobel de physique, en association avec Pieter Zeeman. En dehors de la physique, il joua un rôle actif dans l'internationalisation des échanges scientifiques. Il contribua également à la création des structures les plus édifiantes construites par l'homme sur la Terre : les polders du Zuyderzée.

** Albert Abraham Michelson (n. Strzelno 1852, d. Pasadena 1931) était un physicien prussien, polonais puis américain, il se vit décerner le prix Nobel de physique en 1907. Michelson baptisa le dispositif qu'il avait inventé un *interféromètre*, un terme toujours employé aujourd'hui. Edward William Morley (1838–1923), chimiste américain, était un ami et un collaborateur de longue date de Michelson.

*** Ce point est essentiel. Par exemple, la physique galiléenne établit que seul le mouvement *relatif* est Page 84 physique. Elle exclut également diverses manières mathématiquement possibles, pour obtenir une vitesse de la lumière constante, qui contrediraient l'expérience quotidienne.

L'article original d'Einstein de 1905 débute à partir de deux principes : la constance de la vitesse de la lumière et l'équivalence entre tous les observateurs inertiels. Ce dernier principe avait déjà été formulé en 1632 par Galilée, seule l'invariance de la vitesse de la lumière était nouvelle. Malgré ce fait, la nouvelle théorie fut baptisée – par Poincaré – d'après l'ancien principe, au lieu de l'appeler « théorie de l'invariance », Réf. 14 comme Einstein l'aurait souhaité.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

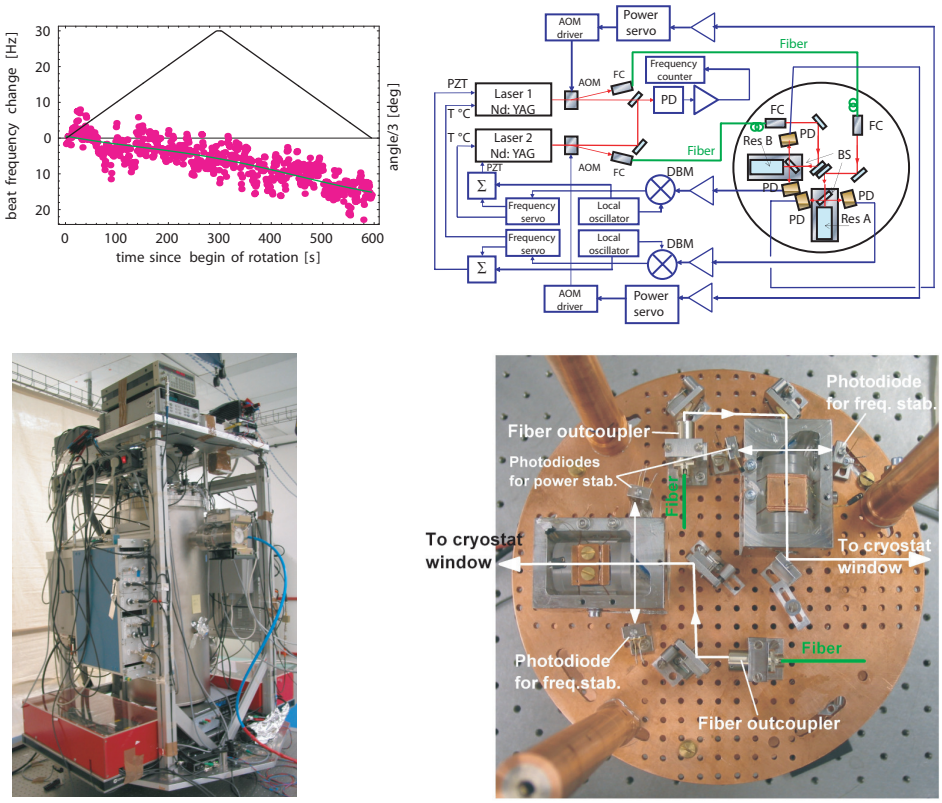


FIGURE 15 Le résultat, le schéma et l'installation du cryostat de l'expérience de Michelson-Morley la plus précise réalisée jusqu'à ce jour. (© Stephan Schiller)

— Dans une pièce fermée flottant librement dans l'espace, il n'y a aucune manière de dire quelle est la vitesse de cette pièce.
— Il n'y a aucune notion de repos (ou d'espace) absolu : le repos (comme l'espace) est un concept dépendant de l'observateur*.
— Le temps dépend de l'observateur, il n'est pas absolu.

Des conclusions plus intéressantes et plus précises peuvent être esquissées lorsque deux conditions supplémentaires sont adoptées. Premièrement, nous étudions des situations où la gravitation peut être négligée. (Si ce n'est pas le cas, nous avons besoin de la relativité *générale* pour décrire le système.) Deuxièmement, nous supposons également que les données concernant les corps étudiés – leur vitesse, leur position, etc. – peuvent être recueillies sans les perturber. (Si ce n'est pas le cas, nous avons besoin de la *théorie quantique* pour décrire le système.)

Pour déduire la manière *précise* selon laquelle les différents intervalles de temps et les longueurs mesurés par deux observateurs sont reliés entre eux, nous allons franchir une étape supplémentaire simplificatrice. Nous commencerons avec une situation dans laquelle les interactions ne jouent aucun rôle. En d'autres termes, nous allons commencer avec la *cinématique relativiste* des corps se déplaçant sans subir de perturbation.

Défi 34 s * Pouvez-vous fournir l'argument qui conduit à cette déduction ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

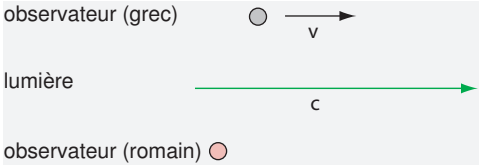


FIGURE 16 Deux observateurs inertiels et un rayon lumineux.

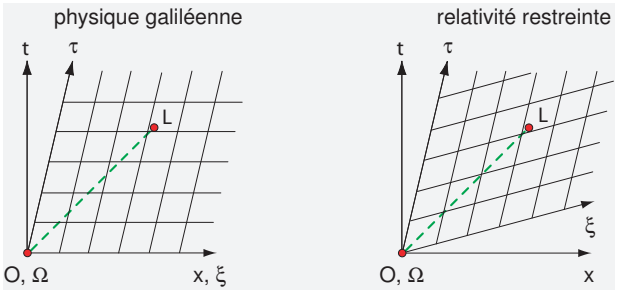


FIGURE 17 Diagrammes d'espace-temps pour la lumière vue par deux observateurs distincts utilisant les coordonnées (t, x) et (τ, ξ).

Si quelqu'un observe un corps libre de toute influence qui voyage le long d'une ligne droite avec une vitesse constante (ou qui demeure au repos), alors nous qualifions cet observateur d'*inertiel*, et les coordonnées utilisées par celui-ci de *référentiel d'inertie*. Chaque observateur inertiel est lui-même en mouvement uniforme. Des exemples d'observateurs (ou de référentiels) inertiels incluent donc – en *deux* dimensions – ceux qui se déplacent sur une surface de glace, sans frottements, ou sur le plancher d'un train ou d'un bateau avançant uniformément. Pour un exemple complet – dans les *trois* dimensions spatiales – nous pouvons prendre celui d'un cosmonaute voyageant dans un vaisseau spatial à partir du moment où les moteurs sont éteints. Les observateurs inertiels en trois dimensions pourraient aussi être décrits comme *flottant librement*. Ils ne sont donc pas si communs. Des observateurs non inertiels sont beaucoup plus courants. Pouvez-vous le confirmer ? Les observateurs inertiels sont les observateurs les plus simples, et ils forment un ensemble particulier :

Défi 35 e

— Deux observateurs inertiels quelconques se déplacent avec une vitesse constante l'un par rapport à l'autre (tant que la gravité n'exerce aucune influence, comme supposé ci-dessus).
— Tous les observateurs inertiels sont équivalents : ils décrivent le monde avec les mêmes équations. Parce qu'elle implique l'absence d'espace et de temps absolus, cette formulation fut appelée *principe de relativité* par Henri Poincaré. Toutefois, l'*essence* de la relativité concerne l'existence d'une vitesse limite.

Pour voir comment les longueurs et les intervalles de temps mesurés varient d'un observateur à l'autre, nous choisissons deux observateurs inertiels, un Romain qui utilise des coordonnées x, y, z et t, et un Grec qui utilise des coordonnées ξ, υ, ζ et τ*, et qui se

* Prononcez « xi », « upsilon », « zeta » et « tau ». Les désignations, correspondances et prononciations de toutes les lettres grecques sont expliquées dans l'Annexe A.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

déplacent avec une vitesse relative **v**. Les axes sont choisis de telle manière que la vitesse pointe dans la direction des x. La constance de la vitesse de la lumière dans toutes les directions, pour deux observateurs quelconques, signifie que pour le mouvement de la lumière les différentielles de coordonnées sont reliées par

$$0 = (c\mathrm{d}t)^2 - (\mathrm{d}x)^2 - (\mathrm{d}y)^2 - (\mathrm{d}z)^2 = (c\mathrm{d}\tau)^2 - (\mathrm{d}\xi)^2 - (\mathrm{d}v)^2 - (\mathrm{d}\zeta)^2 \,. \qquad (11)$$

Supposez également qu'un stroboscope au repos pour l'observateur grec, donc avec $\mathrm{d}\xi = 0$, produise deux flashs séparés par un intervalle de temps $\mathrm{d}\tau$. Pour l'observateur romain, le stroboscope se déplace avec une vitesse v, de telle façon que $\mathrm{d}x = v\mathrm{d}t$. En introduisant cela dans l'expression précédente, et en supposant que la linéarité et l'indépendance de la direction de la vitesse s'appliquent en général, nous trouvons que les intervalles sont reliés par

Défi 36 e

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}t &= \gamma(\mathrm{d}\tau + v\mathrm{d}\xi/c^2) = \frac{\mathrm{d}\tau + v\mathrm{d}\xi/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{avec} \quad v = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t \\
\mathrm{d}x &= \gamma(\mathrm{d}\xi + v\mathrm{d}\tau) = \frac{\mathrm{d}\xi + v\mathrm{d}\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\
\mathrm{d}y &= \mathrm{d}v \\
\mathrm{d}z &= \mathrm{d}\zeta \,. \qquad (12)
\end{aligned}$$

Ces expressions décrivent comment les longueurs et les durées mesurées par des observateurs distincts sont reliées entre elles. À des vitesses relatives v qui sont petites comparées à la vitesse de la lumière, tel que cela se produit dans la vie quotidienne, les durées sont essentiellement identiques, le *facteur de dilatation* ou *correction relativiste* ou *contraction relativiste* γ est alors ajusté à la valeur 1 dans un but pratique. En revanche, pour des vitesses *proches* de celle de la lumière les mesures des deux observateurs donnent des valeurs différentes. Dans ces cas, l'espace et le temps *s'entremêlent*, comme indiqué sur la Figure 17.

Les expressions (12) sont également étranges sur un autre plan. Lorsque deux observateurs se regardent l'un et l'autre, chacun d'eux prétend mesurer des intervalles plus courts que l'autre. En d'autres mots, la relativité restreinte montre que le gazon situé de l'autre côté d'une clôture est toujours *plus court* – si nous roulons à vélo le long de la clôture et si l'herbe est inclinée. Nous allons bientôt explorer ce résultat bizarre plus en détail.

Défi 37 s

Le facteur de dilatation γ est égal à 1 pour la plupart des situations concrètes de la vie courante. La plus grande valeur que des êtres humains aient pu atteindre est environ $2{\cdot}10^5$, la plus grande valeur observée dans la nature est environ 10^{12}. Pouvez-vous imaginer où on peut les rencontrer ?

Défi 38 s

Une fois que nous savons comment les *tranches* d'espace et de temps varient, nous pouvons aisément déduire comment les *coordonnées* varient. Les figures 16 et 17 montrent que la coordonnée x d'un événement L est la somme de deux intervalles : la coordonnée

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ξ et la distance entre les deux origines. En d'autres termes, nous avons

$$\xi = \gamma(x - vt) \quad \text{et} \quad v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \,. \tag{13}$$

En utilisant l'invariance de l'intervalle d'espace-temps, nous obtenons

$$\tau = \gamma(t - xv/c^2) \,. \tag{14}$$

Henri Poincaré appela ces deux relations les *transformations de Lorentz de l'espace et du temps* d'après leur découvreur, le physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz*. Dans une des découvertes les plus admirables de la physique, en 1892 et 1904, Lorentz déduisit ces relations à partir des équations de l'électrodynamique, dans lesquelles elles étaient implicitement contenues, attendant d'être découvertes, depuis 1865**. Cette année-là James Clerk Maxwell avait publié ces équations dans le but de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques. Toutefois, ce fut Einstein qui compris le premier que t et τ, de même que x et ξ, sont aussi corrects l'un que l'autre et donc qu'ils sont des descriptions de l'espace et du temps aussi valides l'une que l'autre.

Réf. 33
Page 53

Les transformations de Lorentz décrivent le changement de point de vue d'un référentiel inertiel à un autre en mouvement. Ce changement de point de vue est appelé une *poussée* (de Lorentz). Les formules (13) et (14) de la poussée sont cruciales pour les deux théories de la relativité, la restreinte et la générale. En réalité, les mathématiques de la relativité restreinte ne seront pas plus difficiles que cela : si vous savez ce qu'est une racine carrée, alors vous pouvez étudier la relativité restreinte dans toute sa splendeur.

De nombreuses formules alternatives pour d'autres transformations ont été explorées, telles que des expressions dans lesquelles l'accélération relative entre les deux observateurs est prise en compte, comme la vitesse relative. Toutefois, elles ont toutes dû être écartées après avoir comparé leurs prédictions aux données expérimentales. Avant de jeter un coup d'œil sur ces expériences, nous allons continuer avec quelques déductions logiques issues des relations de transformation.

Réf. 34

Qu'est-ce que l'espace-temps ?

> « Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbstständigkeit bewaren***. »
>
> Hermann Minkowski.

Les transformations de Lorentz nous disent quelque chose d'important : l'espace et le temps sont deux aspects de la même entité de base. Ils « se mélangent » de différentes

* Pour plus d'informations à propos de Hendrik Antoon Lorentz, voyez la page 33.

** La même découverte avait été annoncée en premier lieu en 1887 par le physicien allemand Woldemar Voigt (1850–1919), Voigt – prononcez « Fohgt » – fut également l'initiateur de l'effet Voigt et du tenseur de Voigt. En 1889, l'Irlandais George F. Fitzgerald trouva également ce résultat de manière indépendante.

*** « Dorénavant l'espace en tant que tel et le temps en tant que tel devront complètement tomber en désuétude et seule une forme d'association des deux préservera leur indépendance. » Cette célèbre phrase constitua le début du discours de Minkowski de 1908 à l'assemblée de la Gesellschaft für Naturforscher und Ärzte.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

manières pour des observateurs distincts. Ce fait est généralement exprimé en disant que le temps est la *quatrième dimension*. Cela semble raisonnable parce que l'entité élémentaire commune – appelée *espace-temps* – peut être définie comme étant l'ensemble de tous les événements, ceux-ci étant décrits par quatre coordonnées dans le temps et l'espace, et parce que l'ensemble de tous les événements possède les propriétés d'une variété*. (Pouvez-vous entériner cela ?)

Défi 39 s

En d'autres termes, l'existence d'une vitesse maximale dans la nature nous oblige à introduire une variété d'espace-temps pour sa description. Dans la théorie de la relativité restreinte, la variété de l'espace-temps est caractérisée par une propriété élémentaire : l'*intervalle d'espace-temps* di entre deux événements proches, défini comme suit

Réf. 35

$$\mathrm{d}i^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - \mathrm{d}x^2 - \mathrm{d}y^2 - \mathrm{d}z^2 = c^2\mathrm{d}t^2(1 - \frac{v^2}{c^2}) \,, \tag{15}$$

est indépendant de l'observateur (inertiel). Un tel espace-temps est aussi appelé espace-temps de Minkowski, d'après Hermann Minkowski**, le professeur d'Albert Einstein. Il fut le premier, en 1904, à définir le concept d'espace-temps et à comprendre son utilité et son importance.

L'intervalle d'espace-temps di de l'équation (15) possède une interprétation simple. C'est le temps mesuré par un observateur en mouvement entre l'événement (t, x) et l'événement $(t + \mathrm{d}t, x + \mathrm{d}x)$, ce que l'on appelle le *temps propre*, multiplié par c. Si nous omettons le facteur c, nous pouvons le désigner plus simplement comme étant le temps de sa montre-bracelet.

Nous *vivons* dans un espace-temps de Minkowski, si on peut le dire ainsi. L'espace-temps de Minkowski existe indépendamment des choses. Et, bien que des systèmes de coordonnées puissent être différents d'un observateur à l'autre, l'entité sous-jacente, l'espace-temps, est toujours *unique*, même si l'espace et le temps ne le sont pas eux-mêmes.

De quelle manière l'espace-temps de Minkowski diffère-t-il de l'espace-temps galiléen, cette combinaison de l'espace et du temps quotidiens ? Les deux espace-temps sont des variétés, c'est-à-dire des ensembles continus de points, ils possèdent tous les deux trois dimensions d'espace et une de temps, et les deux variétés ont la topologie de la sphère trouée. (Pouvez-vous confirmer ce point ?) Les deux variétés sont plates, c'est-à-dire exemptes de toute courbure. Dans les deux cas, l'espace est ce qui est mesuré avec une règle ou avec un rayon lumineux, et le temps est ce qui est lu sur une horloge. Dans les deux cas, l'espace-temps est fondamental, il est et demeure à la fois l'*arrière-plan* et le *conteneur* des objets et des événements.

Défi 40 s

La différence centrale, en réalité la seule, est que l'espace-temps de Minkowski, au contraire de la situation galiléenne, *mélange* l'espace et le temps, et qu'il le fait, en particulier, de manière différente pour des observateurs ayant des vitesses différentes, comme indiqué sur la Figure 17. C'est pourquoi le temps est un concept dépendant de l'observateur.

Page ??

* Le mot « variété » est défini dans l'Annexe **??**.

** Hermann Minkowski (1864–1909) était un mathématicien allemand. Il avait développé des idées proches de celles d'Einstein, mais ce dernier le devança. Minkowski développa alors le concept d'espace-temps. Il décéda brutalement à l'âge de 44 ans.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

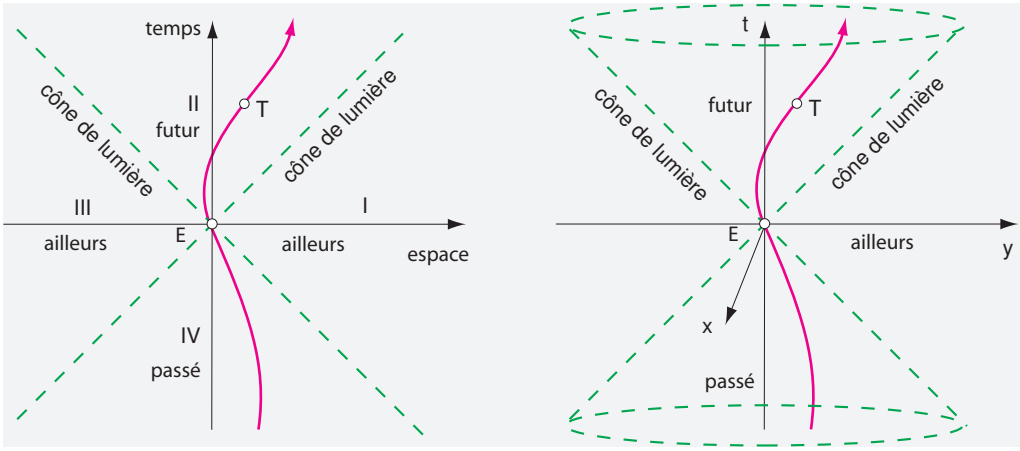


FIGURE 18 Un diagramme d'espace-temps pour un objet T en mouvement vu par un observateur inertiel O dans le cas d'une et de deux dimensions spatiales.

La vitesse maximale dans la nature nous oblige donc à décrire le mouvement à l'aide de l'espace-temps. C'est intéressant, parce que dans l'espace-temps, pour le dire en termes simples, *le mouvement n'existe pas*. Le mouvement n'existe que dans l'espace. Dans l'espace-temps, rien ne bouge. Pour chaque particule ponctuelle, l'espace-temps contient une ligne d'univers. En d'autre mots, au lieu de nous demander pourquoi le mouvement existe, nous pouvons de manière équivalente nous demander pourquoi l'espace-temps est quadrillé par des lignes d'univers. À ce niveau, nous sommes toujours loin de répondre à l'une ou l'autre de ces questions. Ce que nous pouvons faire est d'explorer *comment* le mouvement a lieu.

Pouvons-nous voyager dans le passé ? – Temps et causalité

Nous savons que le temps est différent pour des observateurs distincts. Le temps permet-il malgré tout d'ordonner les événements ? La réponse donnée par la relativité est un franc « oui et non ». Certains ensembles d'événements ne sont pas naturellement ordonnés par le temps, d'autres ensembles le sont. Cela est mieux perçu sur un diagramme d'espace-temps.

En clair, deux événements peuvent être ordonnés uniquement si l'un des événements est la *cause* de l'autre. Mais cette dépendance ne peut s'appliquer que si les événements échangent de l'énergie (c'est-à-dire par l'intermédiaire d'un signal). En d'autres termes, une relation de cause à effet entre deux événements implique que de l'énergie ou des signaux puissent voyager depuis un événement jusqu'à l'autre. Par conséquent, la vitesse reliant les deux événements ne doit pas être plus grande que la vitesse de la lumière. La Figure 18 montre que l'événement E situé à l'origine du système de coordonnées ne peut être influencé que par les événements situés dans le quadrant IV (le *cône de lumière du passé*, lorsque toutes les dimensions d'espace sont prises en compte), et peut lui-même influencer uniquement les événements situés dans le quadrant II (le *cône de lumière du futur*). Les événements des quadrants I et III n'influencent pas et ne sont pas influencés par l'événement E. Le cône de lumière définit la frontière entre les événements qui *peuvent*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

être ordonnés par rapport à leur origine – à savoir ceux à l'intérieur des cônes – et ceux qui *ne le peuvent pas* – ceux à l'extérieur des cônes, se produisant partout ailleurs pour tous les observateurs. (Certains appellent tous les événements qui se produisent ailleurs le *présent*.) Donc, le temps ordonne les événements seulement en *partie*. Par exemple, pour deux événements qui ne sont pas causalement reliés, leur ordre temporel (ou leur simultanéité) dépend de l'observateur !

En particulier, le cône de lumière du passé fournit l'ensemble complet des événements qui peuvent influencer ce qui se passe à l'origine. Nous disons que l'origine est *causalement reliée* au seul cône de lumière du passé. Cette affirmation reflète le fait que n'importe quelle influence entraîne un transport d'énergie, et donc ne peut pas voyager plus vite que la vitesse de la lumière. Remarquez que la relation de cause à effet est un concept invariant : tous les observateurs sont d'accord pour dire qu'elle s'applique ou non à deux
Défi 41 s événements donnés. Pouvez-vous le confirmer ?

Un vecteur situé à l'intérieur du cône de lumière est dit de *genre temps*, un sur le cône de lumière est dit de *genre lumière* ou *nul*, et un à l'extérieur du cône est dit de *genre espace*. Par exemple, la *ligne d'univers* d'un observateur, c'est-à-dire l'ensemble de tous les événements qui façonnent son histoire passée et future, se compose uniquement d'événements de genre temps. Le temps est la quatrième dimension, elle étend l'espace à l'espace-temps et ainsi « complète » cette dernière. Elle représente la pertinence d'une quatrième dimension pour la relativité restreinte, ni plus ni moins.

La relativité restreinte nous enseigne donc que la causalité et le temps peuvent être définis *uniquement* parce que les cônes de lumière existent. Si le transport de l'énergie à des vitesses supérieures à celle de la lumière existait, le temps ne pourrait pas être défini. La causalité, c'est-à-dire la possibilité d'un ordonnancement (partiel) des événements pour tous les observateurs, est due à l'existence d'une vitesse maximale.

Si la vitesse de la lumière pouvait être surpassée d'une certaine manière, le futur pour-
Défi 42 s rait influencer le passé. Pouvez-vous confirmer cette idée ? Dans de telles situations, nous observerions des effets *acausaux*. Cependant, il existe un phénomène quotidien qui nous dit que la vitesse de la lumière est en réalité maximale : notre mémoire. Si le futur pouvait influencer le passé, nous serions également capables de *nous souvenir* du futur. Pour le dire d'une autre manière, si le futur pouvait influencer le passé, le deuxième principe de la thermodynamique ne pourrait pas être valide et notre mémoire ne pourrait pas fonctionner*. Il n'existe aucune autre information, qu'elle soit glanée dans la vie quotidienne ou dans les expériences, qui fournisse une quelconque évidence pour que le futur puisse influencer le passé. En d'autres termes, *le voyage dans le passé est impossible*. Nous révélerons plus tard comment cette situation changera dans la théorie quantique. De façon intéressante, le voyage dans le futur *est* possible, comme nous allons le voir bientôt.

* Un autre résultat, qui est lié, devient petit à petit une vérité notoire. Même si l'espace-temps avait une forme non triviale comme celle d'une topologie cylindrique avec des courbes de genre temps fermées, nous ne serions toujours pas capables de voyager dans le passé, contrairement à ce que de nombreux romans de
Réf. 36 science-fiction suggèrent. Cela a été clairement établi par Stephen Blau dans un récent article très pédagogique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

CURIOSITÉS DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Plus vite que la lumière : jusqu'où pouvons-nous voyager ?

Jusqu'à quelle distance de la Terre pouvons-nous voyager, sachant que le voyage ne devrait pas durer plus longtemps que l'espérance de vie, disons 80 ans, et sachant que nous pouvons utiliser une fusée dont la vitesse peut approcher la vitesse de la lumière aussi près que l'on veuille ? Étant donné le temps t que nous sommes prêts à passer dans une fusée, étant donné la vitesse v de la fusée et en supposant avec optimisme qu'elle puisse accélérer et ralentir durant une quantité infinitésimale de temps, la distance d que
Défi 43 e nous pouvons parcourir est donnée par

$$d = \frac{vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,. \tag{16}$$

Cette distance d est déjà plus grande que ct pour $v > 0,71c$, et, si nous choisissons v assez grand, elle augmente au-delà de toute limite ! En d'autres termes, la relativité ne limite *pas* la distance que nous pouvons parcourir durant une vie entière, et pas même la distance que nous pouvons effectuer en une seule seconde. Nous pourrions, en principe, sillonner l'univers tout entier en moins d'une seconde. Dans des situations telles que celles-ci, il est raisonnable d'introduire le concept de *vitesse propre* w, définie comme

$$w = d/t = \frac{v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma\, v \,. \tag{17}$$

Comme nous venons de le voir, la vitesse propre n'est *pas* limitée par la vitesse de la lumière, en réalité la vitesse propre de la lumière est elle-même infinie*.

Synchronisation et voyage dans le temps – une mère peut-elle rester plus jeune que sa propre fille ?

Une vitesse maximale implique que le temps est différent pour des observateurs distincts qui se déplacent l'un par rapport à l'autre. Donc nous devons être prudents sur la manière de synchroniser des horloges qui sont éloignées, même si elles sont au repos l'une par rapport à l'autre dans un référentiel d'inertie. Par exemple, si nous avons deux montres identiques indiquant la même heure, et si nous transportons l'une d'entre elles le temps d'une promenade et que nous revenons, elles indiqueront des heures dif-
Réf. 38, Réf. 39 férentes à la fin. Cette expérience a été en réalité accomplie plusieurs fois et a entièrement confirmé la prédiction de la relativité restreinte. Le décalage temporel pour une

* En utilisant la vitesse propre, la relation donnée dans l'équation (9) pour la composition de deux vitesses
Défi 44 e $\mathbf{w}_a = \gamma_a \mathbf{v}_a$ et $\mathbf{w}_b = \gamma_b \mathbf{v}_b$ se simplifie en

$$w_{s\parallel} = \gamma_a \gamma_b (v_a + v_{b\parallel}) \quad \text{et} \quad w_{s\perp} = w_{b\perp} \,, \tag{18}$$

où les signes $\parallel$ et $\perp$ désignent respectivement la composante dans la direction de $\mathbf{v}_a$ et la composante per-
Réf. 37 pendiculaire à celle-ci. Nous pouvons en réalité exprimer toute la relativité restreinte en termes de quantités « propres ».

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

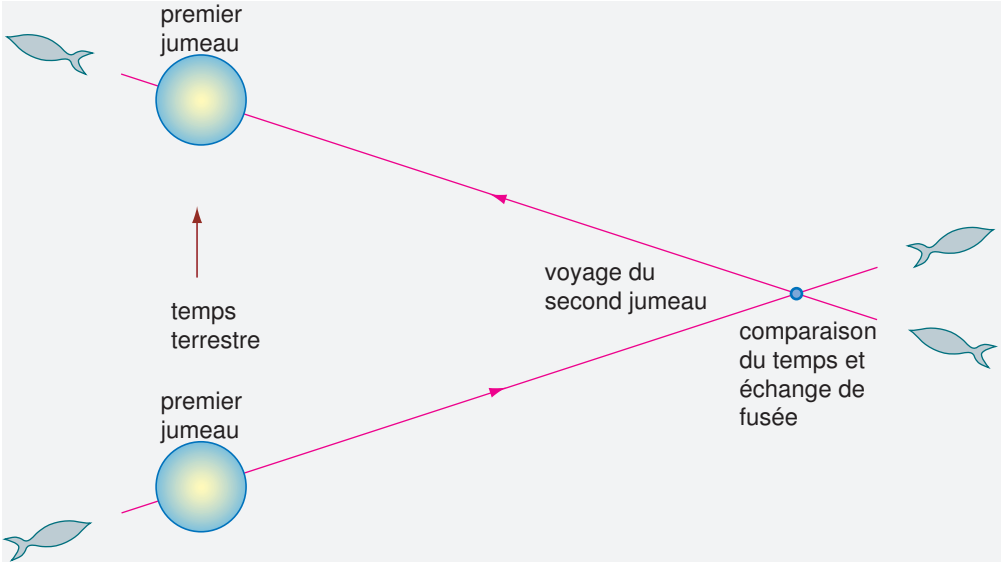


FIGURE 19 Le paradoxe des jumeaux.

personne ou une montre dans un avion effectuant une boucle autour de la Terre, à environ 900 km/h, est de l'ordre de 100 ns – ce qui n'est pas vraiment perceptible dans la vie quotidienne. En fait, le retard est facilement évalué à partir de l'expression

$$\frac{t}{t'} = \gamma \,. \tag{19}$$

Le corps humain est une horloge, il témoigne d'un temps écoulé, généralement appelé l'*âge*, par divers changements dans sa forme, son poids, la couleur des cheveux, etc. Si une personne part pour un long voyage rapide, à son retour elle sera *moins* âgée qu'une seconde personne qui est restée dans sa maison (inertielle).

La plus célèbre illustration en est le fameux *paradoxe des jumeaux* (ou *paradoxe des horloges*). Un jumeau audacieux saute dans une fusée relativiste qui quitte la Terre et voyage durant de nombreuses années. Très loin de la Terre, il bondit dans une autre fusée relativiste empruntant le chemin inverse et revenant au bercail. Ce voyage est illustré sur la Figure 19. À son retour, il remarque que son frère jumeau resté sur Terre est beaucoup plus âgé que lui-même. Pouvez-vous expliquer ce résultat, particulièrement l'asymétrie entre les deux frères ? Ce résultat a également été confirmé lors de nombreuses expériences. Réf. 40

La relativité restreinte confirme donc, sous une forme étonnante, la devise bien connue que les voyages forment la jeunesse. Cependant, le prix à payer pour conserver sa jeunesse est que toutes les choses autour de nous changent vraiment beaucoup plus rapidement que si nous restions au repos par rapport à notre environnement.

Le paradoxe des jumeaux peut aussi être perçu comme une confirmation de la possibilité de voyager dans le futur. À l'aide d'une fusée ultra-rapide qui revient à son point de départ, nous pouvons parvenir à un temps local que nous n'aurions jamais pu atteindre au terme de notre vie en restant chez nous. Hélas, nous ne pouvons *jamais* revenir dans

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

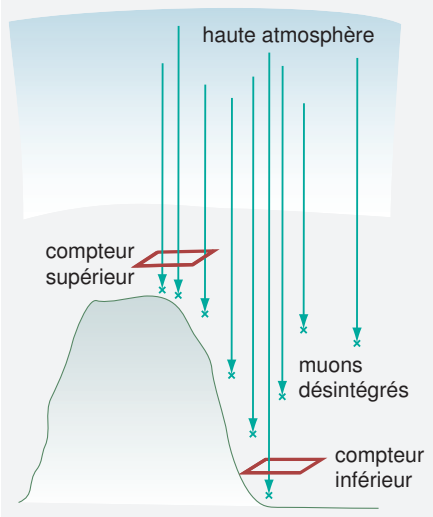


FIGURE 20 Les muons sont plus nombreux que prévu lorsqu'ils parviennent au sol parce que le voyage ultra-rapide entretien leur jeunesse.

le passé*.

Une des expériences les plus simples confirmant la jeunesse prolongée des voyageurs ultra-rapides a trait au comptage des muons. Les muons sont des particules qui sont perpétuellement formées dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques. Les muons *au repos* (par rapport à l'horloge qui prend la mesure) possèdent une demi-vie limitée à 2,2 µs (ou de 660 m, à la vitesse de la lumière). Après ce laps de temps, la moitié des muons sont désintégrés. Cette demi-vie peut être mesurée en utilisant de simples compteurs à muons. En plus, il existe des compteurs spécifiques qui ne comptent que les muons voyageant à une certaine vitesse comprise dans un intervalle, disons de $0,9950c$ à $0,9954c$. Nous pouvons mettre l'un de ces compteurs spécifiques au sommet d'une montagne et en mettre un autre plus bas dans la vallée, comme indiqué sur la Figure 20. La première fois que cette expérience fut réalisée, la différence de hauteur était de 1,9 km. La traversée de cette distance dans l'atmosphère à la vitesse mentionnée prend environ 6,4 µs. Avec la demi-vie donnée ci-dessus, un calcul naïf révèle que seulement 13 % environ des muons observés au sommet devraient parvenir au site inférieur. Pourtant, nous observons qu'environ 82 % des muons arrivent jusqu'en bas. L'explication de ce résultat est fournie par la dilatation relativiste du temps. En réalité, à la vitesse mentionnée, les muons ressentent une différence temporelle d'uniquement 0,62 µs pendant le trajet du sommet de la montagne jusqu'à la vallée. Ce temps plus court fait que le nombre de muons perdus est beaucoup plus petit que s'il n'y avait pas dilatation du temps. Qui plus est, le pourcentage mesuré confirme la valeur donnée par la prédiction du facteur de dilatation du temps γ, aux erreurs expérimentales près, comme vous pourriez le vérifier. Un effet similaire est observé lorsque des muons relativistes sont produits dans des accélérateurs.

Page ??
Réf. 42
Défi 45 s
Défi 46 s

Réf. 41 * Il y a même des ouvrages spécifiques sur le voyage dans le temps, tel le texte très approfondi de Nahin. Remarquez que le concept du voyage dans le temps doit être clairement défini, sinon nous n'aurions aucune objection à formuler à l'employé qui appelle sa chaise de bureau une machine à voyager dans le temps, sous le prétexte que rester assis dessus lui permet d'aller dans le futur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La dilatation de la demi-vie a également été relevée pour de nombreux autres systèmes qui se désintègrent, tels que les pions, les atomes d'hydrogène, les atomes de néon et divers noyaux, confirmant invariablement les prédictions de la relativité restreinte. Puisque tous les corps dans la nature sont constitués de particules, l'« effet jouvence » des hautes vitesses (généralement dénommé « dilatation du temps ») s'applique aux corps de toutes les tailles. En réalité, il n'a pas seulement été observé pour des particules, mais également pour des lasers, des émetteurs radio et des horloges. Réf. 22

Si le mouvement conduit à la dilatation du temps, une horloge située à l'équateur, filant sans cesse tout autour de la Terre, devrait avancer plus lentement qu'une située aux pôles. Toutefois, cette prédiction, qui fut postulée par Einstein lui-même, est incorrecte. Réf. 43 L'accélération centrifuge entraîne une réduction de l'accélération gravitationnelle qui compense exactement l'augmentation due à la vitesse. Ce récit peut servir à rappeler qu'il faut être prudent lorsqu'on applique la relativité restreinte à des situations prenant en compte la gravitation. La relativité restreinte est applicable uniquement lorsque l'espace-temps est plat, et non pas quand la gravité est présente.

En bref, une mère *peut* rester plus jeune que sa fille. Nous pouvons aussi conclure qu'il nous est impossible de synchroniser des horloges au repos l'une par rapport à l'autre simplement en marchant, horloge en main, d'un lieu à un autre. La manière appropriée pour ce faire est d'échanger des signaux lumineux. Pouvez-vous décrire comment ? Défi 47 s

Une définition précise de la synchronisation nous permet de qualifier de simultanés deux événements éloignés. De plus, la relativité restreinte montre que la simultanéité dépend de l'observateur. Toutes les expériences réalisées jusqu'à présent confirment ce point.

Cependant, le désir de cette mère n'est pas facile à satisfaire. Imaginons qu'elle soit accélérée dans un vaisseau spatial s'éloignant de la Terre à 10 m/s^2 pendant dix ans, puis ralentie de 10 m/s^2 durant dix autres années, puis accélérée pendant dix années supplémentaires en direction de la Terre, et finalement ralentie pendant les dix dernières années dans le but de débarquer saine et sauve sur notre planète. Cette mère a mis 40 ans pour réaliser ce voyage. Elle s'est éloignée à 22 000 années-lumière de sa planète natale. À son retour sur Terre, 44 000 années se sont écoulées. Tous cela semble fantastique, jusqu'à ce que nous réalisions que la quantité nécessaire de carburant, même pour le moteur le plus efficace que l'on puisse imaginer, est si considérable que la masse restituée au retour du voyage n'est que d'une seule partie pour $2 \cdot 10^{19}$. Cette quantité nécessaire de carburant n'existe pas sur Terre. Défi 48 e

Contraction des longueurs

La longueur d'un objet mesurée par un observateur attaché à cet objet est appelée sa longueur propre. En accord avec la relativité restreinte, la longueur mesurée par un observateur inertiel passant à proximité est toujours plus petite que sa longueur propre. Ce résultat découle directement des transformations de Lorentz. Défi 49 e

Pour une Ferrari roulant à 300 km/h ou 83 m/s, la longueur est réduite de 0,15 pm : c'est moins que le diamètre d'un proton. Vue depuis le Soleil, la Terre se déplace à 30 km/s, ce qui donne une contraction de sa longueur de 6 cm. Aucun de ces effets n'a jamais été mesuré. Mais des effets plus significatifs le pourraient. Explorons-en quelques exemples.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

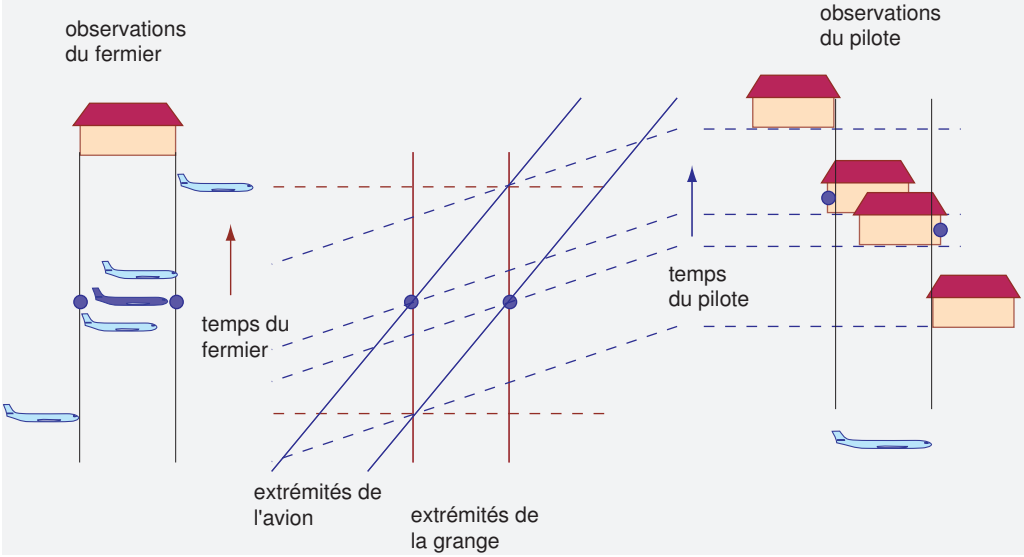


FIGURE 21 Les observations du pilote et du propriétaire de la grange.

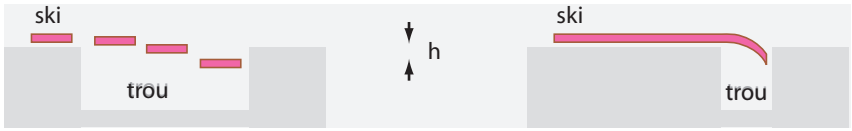


FIGURE 22 Les observations du creuseur de pièges et du surfeur des neiges, telles qu'elles sont publiées (par erreur) dans la littérature.

Imaginez qu'un pilote vole en traversant une grange dotée de deux portes, une à chaque extrémité. L'avion est légèrement plus long que la grange, mais se déplace si rapidement que sa longueur, contractée par la relativité, est plus courte que la longueur de la grange. Le fermier peut-il fermer la grange (au moins pendant un court instant) avec l'avion entièrement situé à l'intérieur ? La réponse est oui. Mais pourquoi le pilote ne peut-il pas dire la chose suivante : par rapport à lui, la grange est contractée, par conséquent l'avion ne peut être contenu tout entier dans celle-ci ? La réponse est indiquée sur la Figure 21. Pour le fermier, les portes se ferment (et se rouvrent) au même moment. Pour le pilote, ce n'est pas le cas. Pour le fermier, le pilote est dans l'obscurité durant un court instant ; pour le pilote, la grange n'est jamais sombre. (Ce n'est pas entièrement vrai : pouvez-vous en développer les détails ?)

Défi 50 s

Nous explorons maintenant quelques variantes du cas général. Un surfeur des neiges ultra-rapide peut-il tomber dans un trou qui est un petit peu plus court que sa planche ? Imaginez-le surfer si rapidement que le facteur de contraction des longueurs $\gamma = d/d'$ soit de 4*. Pour un observateur sur le sol, la planche de surf est quatre fois plus courte et, lorsqu'elle passe au-dessus du trou, elle chutera dedans. En revanche, pour le surfeur, c'est le trou qui est quatre fois moins large, dans ce cas il semble que la planche de surf ne puisse pas tomber dedans.

* Même la Terre se contracte dans la direction de son ouvement autour du Soleil. Cette valeur est-elle mesurable ?

Défi 51 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

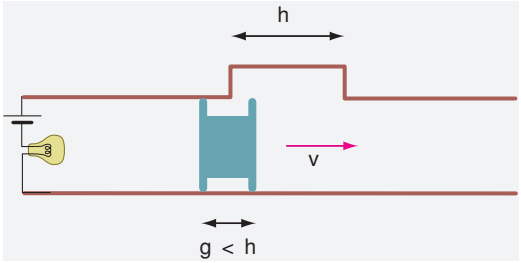


FIGURE 23 Est-ce que la pièce conductrice glissante laisse l'ampoule allumée, à très grande vitesse ?

FIGURE 24 Qu'advient-il à la corde ?

Réf. 44 Une analyse plus attentive montre que, contrairement à l'observation du creuseur de trous, le surfeur des neiges ne voit pas que la forme de la planche est figée : au moment de passer au-dessus du trou, il observe que la planche affecte une forme parabolique et chute Défi 52 e dans le trou, comme indiqué sur la Figure 22. Pouvez-vous le confirmer ? En d'autres termes, la forme n'est pas une notion invariante. (Toutefois, la rigidité *est* invariante par rapport à l'observateur, si elle est correctement définie. Pouvez-vous appuyer ce dernier Défi 53 s point ?)

Réf. 45 Cette explication, bien que répandue, n'est pas exacte, comme Harald van Lintel et Christian Gruber l'ont souligné. Nous ne devrions pas oublier d'estimer la durée de l'effet. Aux vitesses relativistes le temps requis pour que le trou agisse sur toute l'épaisseur de la planche ne peut pas être négligé. Le surfeur des neiges voit que sa planche prend une forme parabolique seulement si elle est extrêmement fine et flexible. Pour des planches ordinaires se déplaçant à des vitesses relativistes, le surfeur n'a pas le temps de tomber Défi 54 pe d'une hauteur h appréciable ou de voir sa planche se courber dans le trou avant de passer dessus. La Figure 22 est si exagérée qu'elle est inexacte. Le surfeur des neiges devrait tout simplement filer à toute vitesse au-dessus du trou.

Réf. 46 Les paradoxes autour de la contraction des longueurs deviennent même plus intéressants dans le cas d'un conducteur glissant qui établit un contact électrique entre deux rails, comme dessiné sur la Figure 23. Les deux rails sont parallèles, mais l'un d'entre eux possède un décrochement qui est plus long que la pièce glissante. Pouvez-vous rechercher si une ampoule reliée en série reste allumée lorsque la pièce glissante se déplace Défi 55 s le long des rails à une vitesse relativiste ? (Faites l'hypothèse simplificatrice, mais non parfaitement réaliste, que le courant électrique s'écoule instantanément dès que la pièce touche les rails.) Obtenez-vous le même résultat pour tous les observateurs ? Et qu'arrive-t-il lorsque la pièce glissante est plus longue que le décrochement ? (Attention : ce problème a donné naissance à des débats *houleux* !) Qu'est-ce qui est irréaliste dans cette expérience ?

Réf. 47 Un autre exemple de contraction des longueurs apparaît lorsque deux objets, disons deux voitures, sont reliés sur une distance d par une corde tendue, comme indiqué sur la Figure 24. Imaginez que les deux véhicules soient au repos à l'instant $t = 0$ puis soient accélérés ensemble exactement de la même façon. L'observateur au repos soutiendra que les deux voitures demeurent à la même distance l'une de l'autre. De l'autre point de vue, la corde doit recouvrir une distance $d' = d/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, et doit donc s'allonger lorsque

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

les deux véhicules accélèrent. En d'autres termes, la corde rompra. Cette prédiction est-
Défi 56 s elle confirmée par les observateurs situés dans chacun des deux véhicules ?

Un exemple amusant – mais complètement irréaliste – de contraction des longueurs
Réf. 48 est celui d'un sous-marin se déplaçant horizontalement. Imaginez que le sous-marin stationnaire ait ajusté son poids afin de flotter dans l'eau sans avoir tendance à couler ni à s'élever. Maintenant, le sous-marin se déplace (avec une vitesse relativiste possible). Le capitaine observe que l'eau à l'extérieur est contractée selon la formule de Lorentz, donc l'eau est plus dense et il conclut que le sous-marin s'élèvera. Un poisson situé à proximité voit le sous-marin se contracter, donc ce dernier devient plus dense que l'eau, et conclut
Défi 57 s que celui-ci coulera. Qui prêche le faux ? Quelle est la contrainte de flottabilité ? À ce sujet, répondez à la question suivante : pourquoi est-il impossible pour un sous-marin
Défi 58 s de se déplacer à une vitesse relativiste ?

En résumé, la contraction des longueurs ne peut pratiquement jamais être observée pour des corps macroscopiques. Toutefois, elle joue un rôle important pour les *images*.

Images relativistes – aberration et effet Doppler

Nous avons rencontré plusieurs situations dans lesquelles les observations varient lorsqu'un observateur se déplace à très grande vitesse. En tout premier lieu, la contraction de Lorentz et l'aberration provoquent la *distorsion* des images. Deuxièmement, l'aberration augmente l'angle de vision au-delà des 180 degrés approximatifs que les êtres humains perçoivent dans la vie quotidienne. Un observateur relativiste qui regarde dans la direction du mouvement reçoit de la lumière qui est invisible pour un observateur stationnaire, parce que, pour ce dernier, elle arrive par derrière. Troisièmement, l'effet Doppler engendre un *décalage de couleurs* sur les images. Quatrièmement, le mouvement rapide modifie la *luminosité* et le *contraste* de l'image : c'est l'*effet projecteur*. Chacune de ces modifications dépend de la direction du regard, elles sont montrées sur la Figure 26.

Les ordinateurs modernes nous permettent de reproduire les observations faites par des voyageurs ultra-rapides avec une qualité photographique, et même de produire des simulations animées*. Les images de la Figure 25 sont particulièrement opportunes pour nous permettre de comprendre la déformation relativiste des images. Elles indiquent l'angle de vision, le cercle qui distingue les objets qui sont devant l'observateur de ceux qui se trouvent derrière lui, les coordonnées des pieds de l'observateur et le point sur l'horizon en direction duquel se déplace cet observateur. En intégrant ces repères dans votre esprit lorsque vous regardez d'autres images ou films, vous devez comprendre plus clairement ce que représentent ces images.

Nous notons que la forme de l'image vue par un observateur en mouvement est une version *distordue* de celle vue par un observateur au repos au même endroit. Toutefois, un observateur en déplacement ne voit pas des objets différents d'un autre observateur stationnaire au même emplacement. En fait, les cônes de lumière sont indépendants du mouvement d'un observateur.

* Consultez par exemple des images et des films sur http://www.anu.edu.au/Physics/Searle par Anthony Searle, sur http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~weiskopf/gallery/index.html par Daniel Weiskopf, sur http://www.itp.uni-hannover.de/~dragon/stonehenge/stone1.htm par Norbert Dragon et Nicolai Mokros, ou sur http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de par le groupe de Hanns Ruder.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

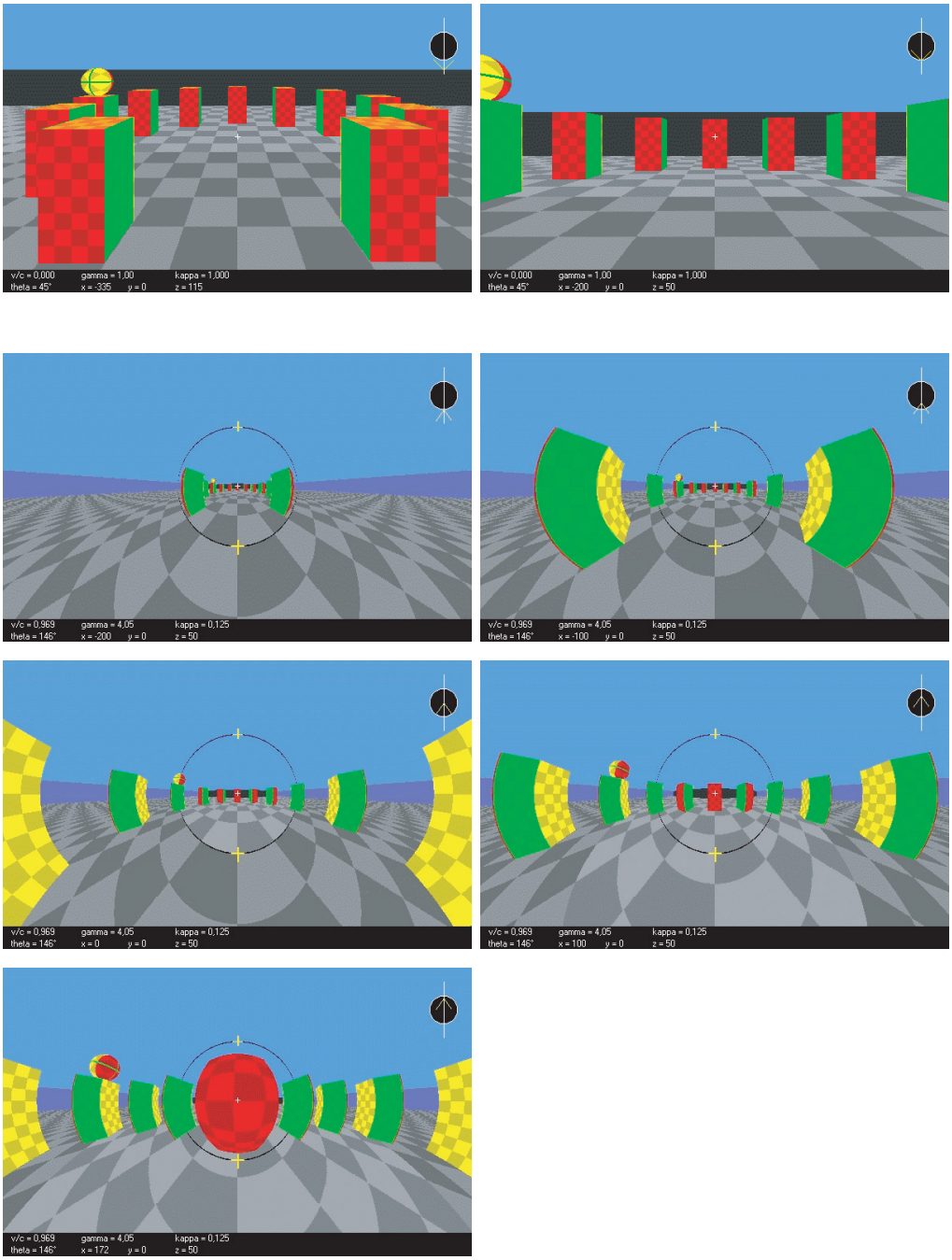


FIGURE 25 Traversée de douze colonnes verticales (indiquées sur les deux images du haut) à 0,9 fois la vitesse de la lumière tel que simulé par Nicolai Mokros et Norbert Dragon, exhibant ainsi l'effet de la vitesse et de la position sur les distorsions. (© Nicolai Mokros)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

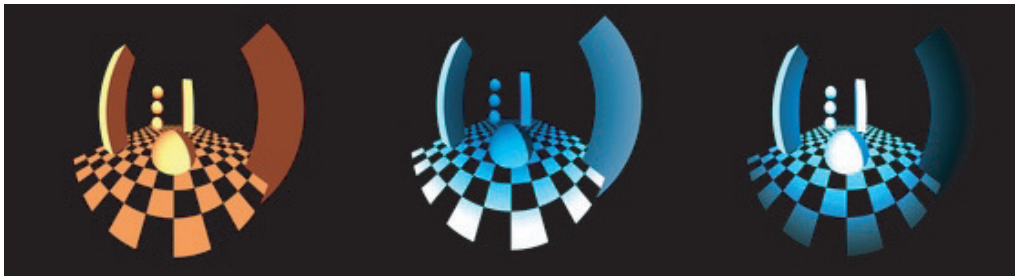


FIGURE 26 Traversée de trois colonnes droites verticales à 0,9 fois la vitesse de la lumière tel que simulé par Daniel Weiskopf : à gauche avec les couleurs d'origine, au milieu en intégrant l'effet Doppler, et à droite en incluant les effets sur la luminosité, montrant ainsi ce qu'un observateur verrait réellement. (© Daniel Weiskopf)

FIGURE 27 Ce qu'un chercheur qui se tient debout et un autre courant rapidement à travers un couloir observent (en omettant les effets sur les couleurs). (© Daniel Weiskopf)

La contraction de Lorentz est mesurable, pourtant elle ne peut pas être photographiée. Réf. 49 Cette distinction surprenante ne fut découverte qu'en 1959. La mesure implique la simultanéité à la position de l'objet, la photographie entraîne la simultanéité à la position de l'observateur. Sur une photographie, la contraction de Lorentz est modifiée par les effets dus aux différents temps de trajet de la lumière depuis les différentes parties d'un objet. Le résultat provoque un changement dans la forme qui rappelle une rotation, bien que n'en étant pas exactement une. La déformation résultante est une aberration dépendant Page 18 de l'angle. Nous avons discuté de l'aberration au début de cette section. L'aberration

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

transforme des cercles en d'autres cercles : de telles transformations sont dites *conformes*.

Les images de la Figure 27, produites par Daniel Weiskopf, intègrent également l'effet Doppler et les changements de luminosité. Elles montrent que ces effets sont au moins aussi saisissants que la distorsion due à l'aberration.

Cela nous conduit au « paradoxe du collier de perles ». Si le mouvement relativiste transforme des sphères en sphères, et des tiges en tiges plus courtes, que se passe-t-il pour un collier de perles se déplaçant le long de son grand axe ? Devient-il plus court ?

Défi 59 s

Il y a encore beaucoup de choses à explorer grâce aux films relativistes. Par exemple, l'auteur prédit que des films de sphères en mouvement de rotation rapide révéleront des effets intéressants. Dans ce cas aussi, l'observation visuelle et les résultats des mesures seront divergents. Pour certaines combinaisons de rotations relativistes et de poussées relativistes, il a été postulé* que le sens de rotation (horaire ou antihoraire) sera *différent* pour des observateurs distincts. Cet effet jouera un rôle intéressant dans la discussion sur l'unification.

Défi 60 r

Quelle est la meilleure place dans un bus ?

Réf. 47

Explorons une autre surprise de la relativité restreinte. Imaginez des jumeaux à l'intérieur de deux véhicules accélérés de manière identique, l'un devant l'autre, partant du point mort à l'instant $t = 0$, comme le décrit un observateur au repos par rapport aux jumeaux. (Il n'y a pas de corde qui relie les voitures maintenant.) Les deux véhicules contiennent la même quantité de carburant. Nous en déduisons aisément que l'accélération des deux jumeaux cessera lorsque le carburant s'épuisera, au même instant dans le référentiel de l'observateur extérieur. De plus, la distance entre les voitures est restée identique tout au long de la course pour cet observateur, et les deux voitures continuent de rouler avec une vitesse constante v identique, tant que le frottement reste négligeable. Si nous appelons les événements correspondant à l'arrêt des moteurs de la voiture de devant et de celle de derrière respectivement a et b, leurs coordonnées temporelles dans le référentiel extérieur sont tout simplement reliées par $t_a = t_b$. En utilisant les transformations de Lorentz vous pouvez en déduire, dans le référentiel des jumeaux roulant librement, la relation

Défi 61 e

Défi 62 e

$$t_b = \gamma \Delta x \, v/c^2 + t_a \,, \tag{20}$$

qui signifie que le jumeau de devant a vieilli *plus vite* que le jumeau de derrière ! Par conséquent, dans des systèmes accélérés, le vieillissement dépend de la position.

Pour choisir une place dans un bus, cependant, ce résultat ne nous est d'aucune aide. Il est vrai que la meilleure place dans un bus en accélération est celle du fond, mais dans un bus qui ralentit c'est celle de devant. À la fin du parcours, le choix du siège n'importe plus.

Est-il exact d'en déduire que les gens qui habitent dans les hautes montagnes vieillissent plus vite que ceux des vallées, au point que vivre dans une vallée permettrait de retarder l'apparition des cheveux blancs ?

Défi 63 s

* En juillet 2005.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

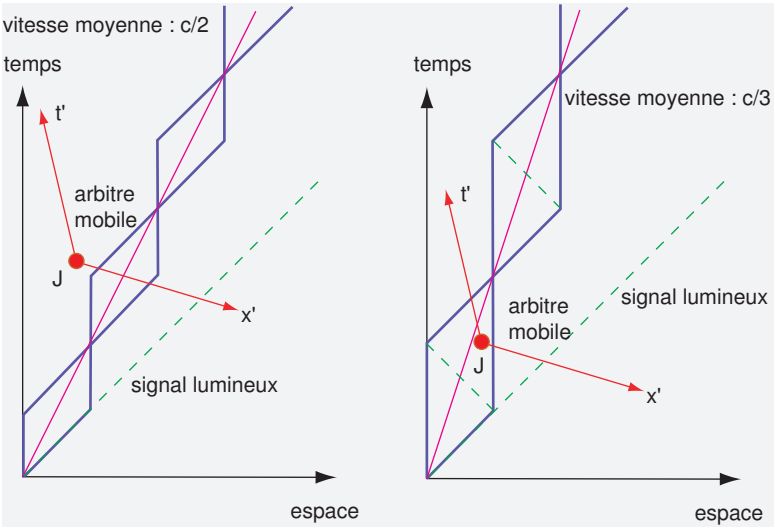


FIGURE 28 Pour l'athlète de gauche, l'arbitre se déplaçant dans la direction opposée voit ses deux pieds hors du sol à certains moments, mais pas pour celui de droite.

À QUELLE VITESSE POUVONS-NOUS MARCHER ?

Marcher signifie déplacer les pieds de telle façon qu'au moins l'un des deux soit toujours sur le sol à chaque instant. C'est une des règles que les athlètes doivent respecter dans les compétitions olympiques de marche à pied, au risque d'être disqualifiés. Un étudiant athlète était en train de réfléchir sur la vitesse maximale théorique qu'il pourrait atteindre aux Jeux olympiques. L'idéal serait que chaque pied puisse accélérer instantanément jusqu'à (pratiquement) la vitesse de la lumière. Pour atteindre la vitesse la plus élevée à la marche, il faudrait lever le second pied du sol exactement au même instant que le premier est posé. Par « même instant », l'étudiant entendait au départ « tel que perçu par l'arbitre de la compétition au repos par rapport à la Terre ». Le mouvement des pieds est indiqué par le diagramme de gauche de la Figure 28. Cela donne une vitesse limite pour la marche égale à la moitié de la vitesse de la lumière. Mais alors l'étudiant remarqua qu'un arbitre *en mouvement* verrait ses deux pieds hors du sol et ainsi éliminerait l'athlète de la course. Pour éviter une disqualification par *n'importe quel* arbitre, le second pied doit attendre un signal lumineux du premier. La vitesse limite pour la marche à pied olympique n'est donc que d'un tiers de la vitesse de la lumière.

Réf. 50

LA VITESSE DE L'OMBRE EST-ELLE PLUS GRANDE QUE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ?

En réalité, le mouvement plus rapide que la lumière existe et est même plutôt commun. La relativité restreinte contraint seulement le mouvement de la masse et de l'énergie. Ainsi, des points immatériels ou des images et des dispositifs qui ne transportent pas d'énergie *peuvent* se déplacer plus vite que la lumière. Il en existe plusieurs exemples simples. Pour être clair, nous ne parlons pas de vitesse *propre*, laquelle ne peut pas, de toute façon, être définie dans ces situations. (Pourquoi ?)

Page 41
Défi 64 s

Les exemples suivants montrent des vitesses qui sont véritablement plus élevées que

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

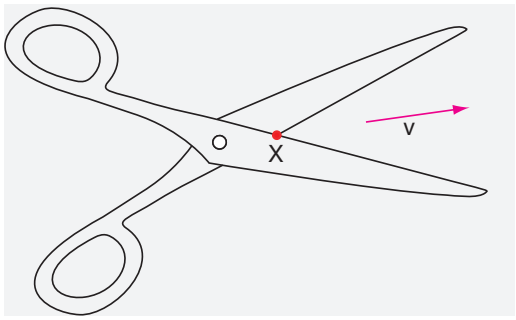


FIGURE 29 Un exemple élémentaire de mouvement qui est plus rapide que la lumière.

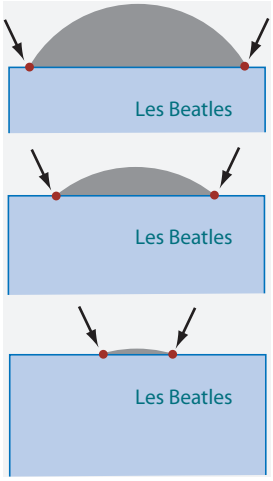


FIGURE 30 Un autre exemple de mouvement plus rapide que la lumière.

celle de la lumière dans le vide.

Considérez le point repéré par X sur la Figure 29, l'emplacement où les ciseaux coupent le papier. Si ces ciseaux sont refermés suffisamment rapidement, ce point se déplace plus vite que la lumière. Des exemples similaires peuvent également être soulignés pour chaque fenêtre, et en fait pour n'importe quel dispositif qui possède des parties rotatives.

Une autre occurrence de mouvement supraluminique survient dans le cas d'un disque vinyle – un vieux disque 33 tours démodé – disparaissant dans sa pochette, comme indiqué sur la Figure 30. Le point où le bord du disque rencontre le bord de la pochette peut voyager plus vite que la lumière.

Un autre exemple vient à l'esprit lorsque nous nous rappelons que nous vivons sur une planète sphérique. Imaginez que vous soyez allongé sur le sol et que vous vous mettiez debout. Pouvez-vous montrer que la vitesse avec laquelle l'horizon s'éloigne de vous peut être plus grande que celle de la lumière ? Défi 65 s

Pour finir, le mouvement d'un point lumineux produit en éclairant la Lune avec un rayon laser est un exemple classique. Si le laser est agité, le point peut facilement se déplacer plus vite que la lumière. La même chose s'applique au point lumineux situé sur l'écran d'un oscilloscope lorsqu'un signal de fréquence suffisamment élevée est alimenté en entrée.

Tout cela sorrespond à des exemples typiques de la *vitesse des ombres*, parfois également appelée *vitesse de l'obscurité*. Les ombres et l'obscurité peuvent en réalité se déplacer tous les deux plus vite que la lumière. En fait, il n'y a aucune limite pour leur vitesse. Pouvez-vous citer un autre exemple ? Défi 66 s

De plus, il y a un nombre toujours croissant d'installations expérimentales dans lesquelles la vitesse de phase ou même la vitesse de groupe de la lumière est plus grande que c. Elles font régulièrement la une des journaux, généralement sous le titre « la lumière se déplace plus vite que la lumière ». Nous discuterons de ce phénomène surprenant plus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Page 102 en détail un peu plus tard. En fait, ces situations peuvent aussi être vues – avec un peu d'imagination – comme des cas particuliers du phénomène de la « vitesse de l'ombre ».

Pour citer un exemple différent, imaginez que nous soyons situés à la sortie d'un tunnel de longueur l. Nous voyons une voiture, dont nous savons que sa vitesse est v, entrant à l'autre extrémité du tunnel et roulant dans notre direction. Nous savons qu'elle y entre parce qu'elle n'est plus au soleil ou parce que ses feux sont allumés à ce moment-là. À quel instant t, après que nous l'aurons vue entrer dans le tunnel, nous dépassera-t-elle ? Un raisonnement élémentaire indique que t est donné par

$$t = l/v - l/c \ . \tag{21}$$

En d'autres termes, la voiture qui s'approche semble avoir une vitesse v_{appr} de

$$v_{\text{appr}} = \frac{l}{t} = \frac{vc}{c - v} \ , \tag{22}$$

qui est plus grande que c pour n'importe quelle vitesse v supérieure à $c/2$. Pour des voitures cela ne se produit pas très souvent, mais les astronomes connaissent un type d'objet lumineux dans le ciel appelé *quasar* (une contraction de « quasi-stellar object »), qui émet parfois des jets de gaz ultra-rapides. Si l'émission est dans la direction de la Terre, ou proche de cette direction, sa vitesse apparente – et même sa composante purement transversale – est plus grande que c. De telles circonstances sont aujourd'hui
Réf. 51 fréquemment observées avec les télescopes.

Remarquez que, pour un deuxième observateur situé à l'*entrée* du tunnel, la vitesse apparente du véhicule qui *s'éloigne* est donnée par

$$v_{\text{éloi}} = \frac{vc}{c + v} \ , \tag{23}$$

ce qui n'est *jamais* supérieur à $c/2$. En d'autres termes, nous n'observons jamais d'objets s'éloignant à plus de la moitié de la vitesse de la lumière.

Cette histoire possède un ultime rebondissement. Nous venons de voir qu'un mouvement plus rapide que la lumière peut être observé dans plusieurs situations. Mais un *objet* se déplaçant plus vite que la lumière pourrait-il malgré tout être observé ? De façon surprenante, il le pourrait, mais de manière plutôt insolite. Premièrement, puisqu'un tel objet imaginaire, que l'on appelle généralement un *tachyon*, se déplace plus vite que la lumière, nous ne pouvons jamais le voir filer dans notre direction. S'il peut malgré tout être aperçu, un tachyon ne peut être vu que de telle manière qu'il s'éloigne de nous. Apercevoir un tachyon pourrait être similaire à entendre un jet supersonique. Ce n'est qu'*après* que le tachyon sera passé à proximité, en supposant qu'il soit visible le jour, que nous pourrions le remarquer. Nous verrions d'abord un flash lumineux, correspondant au bang d'un avion filant à une vitesse supersonique. Nous verrions ensuite *deux* images du tachyon, apparaissant quelque part dans l'espace et s'éloignant dans des directions opposées, comme nous pouvons le déduire de la Figure 31. Même si l'une des deux images s'approchait de nous, elle paraîtrait de plus en plus petite et indistincte. C'est, pour le moins, un comportement plutôt inhabituel. Qui plus est, si vous vouliez observer

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

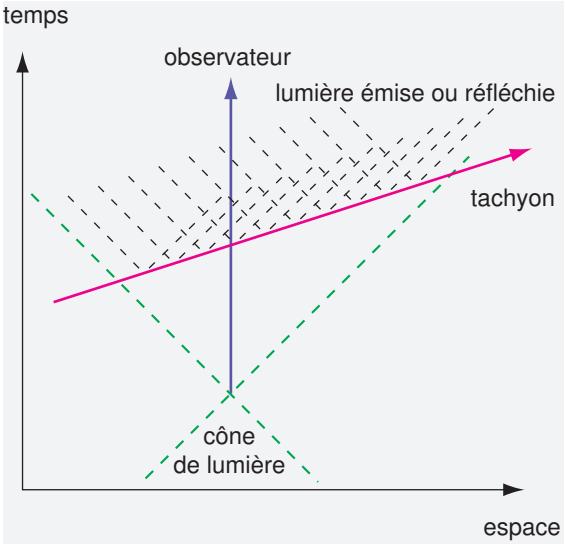


FIGURE 31 Diagramme d'espace-temps hypothétique pour l'observation du tachyon.

un tachyon en pleine nuit, en l'éclairant à l'aide d'une torche électrique, vous devriez alors tourner votre tête dans la direction opposée au bras qui tient la torche ! Cette condition découle également du diagramme de l'espace-temps : pouvez-vous voir pourquoi ? Personne n'a jamais observé un tel phénomène. Les tachyons, s'ils existaient, seraient de bien curieux objets : ils accéléreraient lorsqu'ils perdent de l'énergie ; un tachyon d'énergie nulle serait plus rapide que tout, avec une vitesse infinie, et la direction de son mouvement dépendrait du mouvement de l'observateur. Aucun objet possédant ces propriétés n'a été observé. Pire, comme nous l'avons vu, les tachyons sembleraient surgir du néant, contredisant les lois de conservation. Comme les tachyons ne peuvent pas être vus au sens habituel du terme, remarquez qu'ils ne peuvent pas non plus être touchés, puisque ces deux processus font appel aux interactions électromagnétiques, comme nous le verrons plus tard dans notre ascension de la Montagne Mouvement. Les tachyons ne peuvent donc pas représenter des objets au sens usuel du terme. Dans la deuxième partie de notre aventure, nous montrerons que la théorie quantique *exclut* véritablement l'existence des tachyons (réels). Cependant, comme nous le découvrirons, elle *réclame* en même temps l'existence de tachyons « virtuels ».

Défi 67 e
Réf. 52
Page 63

La parallèle à une parallèle n'est pas parallèle – la rotation de Thomas

En vérité, la relativité conduit à des conséquences étranges. Deux observateurs quelconques peuvent maintenir un bâton parallèle à un autre, même s'ils se déplacent l'un relativement à l'autre. Mais étrangement, étant donné une série de bâtons pour lesquels deux bâtons adjacents quelconques sont parallèles, le premier et le dernier ne seront généralement *pas* parallèles. En particulier, ils ne le seront *jamais* si les mouvements des divers observateurs pointent dans des directions différentes, comme dans le cas où l'ensemble des vecteurs vitesse forme une boucle.

Le dispositif le plus simple est indiqué sur la Figure 32. En relativité restreinte, un

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

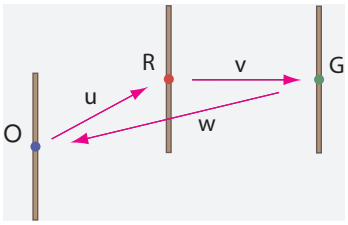


FIGURE 32 Si le bâton O est parallèle à R et R parallèle à G, alors le bâton O et le bâton G ne le sont pas.

enchaînement général de mouvements purement translationnels ne donne pas à l'arri-
Réf. 53 vée un mouvement purement translationnel, mais une translation plus une rotation. Par conséquent, les éléments extrémaux d'un ensemble de bâtons parallèles ne sont généralement pas parallèles.

Un exemple de cet effet survient dans le mouvement de rotation. Si nous marchons rapidement le long d'un cercle en tenant un bâton, et en maintenant constamment celui-ci parallèlement à la direction qu'il avait juste avant, à la fin de cette course circulaire le bâton fera un certain angle non nul par rapport à la direction d'origine. De manière identique, l'axe d'un corps en rotation tournant autour d'un deuxième corps ne pointera *pas* dans la même direction au bout d'une révolution. Cet effet est nommé la *précession de Thomas*, d'après Llewellyn Thomas, qui le découvrit en 1925, vingt années après la naissance de la relativité restreinte. Il avait échappé à l'attention d'une douzaine d'autres célèbres physiciens. La précession de Thomas est cruciale dans le fonctionnement interne des atomes, nous reviendrons là-dessus dans une section ultérieure de notre aventure. Ces phénomènes surprenants sont purement relativistes, et ne sont donc mesurables *que* dans le cas de vitesses comparables à celle de la lumière.

Une histoire sans fin – température et relativité

Les écrits relatifs à la température sont confus. Albert Einstein et Wolfgang Pauli étaient d'accord sur le résultat suivant : la température T, relevée par un observateur se déplaçant à la vitesse v, est reliée à la température T_0, mesurée par l'observateur au repos par rapport à la température ambiante, par

$$T = T_0\sqrt{1 - v^2/c^2}\,. \tag{24}$$

Un observateur en mouvement mesure donc toujours des valeurs inférieures à celles mesurées par un observateur au repos.

En 1908, Max Planck utilisa cette expression, en combinaison avec la transformation correspondante de la chaleur, pour déduire que l'entropie est invariante sous les transformations de Lorentz. Étant le révélateur de la constante de Boltzmann k, Planck démontra de cette façon que cette constante est un invariant relativiste.

Tous les chercheurs ne s'accordent pas sur cette expression. D'autres soutiennent que T et T_0 devraient être échangés dans la transformation de la température. De même, des
Réf. 54 puissances différentes de la simple racine carrée ont été proposées. L'origine de ces discordances est évidente : la température est définie uniquement pour des situations d'équilibre, c'est-à-dire pour des bains thermiques. Mais un bain thermique pour un observa-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

teur n'en est pas un pour l'autre. Pour des vitesses lentes, un observateur en mouvement observe une situation qui est *presque* identique à un bain thermique, mais à des vitesses plus élevées ce problème devient plus subtil. La température est déduite de la vitesse des particules de matière, tels les atomes et les molécules. Pour des observateurs mobiles, il n'existe aucune méthode convenable pour mesurer la température. La valeur mesurée naïvement pour la température dépend même de l'étendue de l'énergie des particules de matière concernées ! En bref, l'équilibre thermique n'est pas un concept invariant selon l'observateur. Par conséquent, *aucune* formule de transformation de la température n'est correcte. (Avec quelques hypothèses supplémentaires, l'expression de Planck ne semble toutefois pas cohérente.) En fait, il n'existe même pas une quelconque observation expérimentale qui permettrait de vérifier une telle formule. La réalisation d'une telle mesure constitue un défi pour les futurs expérimentateurs – mais pas pour la relativité elle-même.

MÉCANIQUE RELATIVISTE

Puisque la vitesse de la lumière est constante et puisque les vitesses ne s'additionnent pas simplement, nous avons besoin de redéfinir les notions de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Nous avons par conséquent besoin de rebâtir la théorie de la mécanique à partir de zéro.

La masse en relativité

Page 72

En physique galiléenne, le rapport des masses entre deux corps a été défini en utilisant la notion de collision ; il était donné par l'opposé du rapport inverse des variations de vitesses

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} \,. \tag{25}$$

Toutefois, des expériences démontrent que cette expression doit être modifiée pour des vitesses approchant celle de la lumière. En fait, des expériences ne sont pas nécessaires :

Défi 68 pe

nous pouvons montrer cela uniquement par la pensée. Pouvez-vous y parvenir ?

Il y a une seule solution à ce problème. Les deux théorèmes de conservations galiléennes, $\sum_i m_i \mathbf{v}_i$ = constante pour la quantité de mouvement et $\sum_i m_i$ = constante pour la masse, doivent être modifiés en

Réf. 55

$$\sum_i \gamma_i m_i \mathbf{v}_i = \text{constante} \tag{26}$$

et

$$\sum_i \gamma_i m_i = \text{constante} \,. \tag{27}$$

Ces expressions, qui demeureront inchangées jusqu'à la fin de notre escalade de la Montagne Mouvement, impliquent, entre autres, que la téléportation est *impossible* dans la nature. (Pouvez-vous le confirmer ?) Évidemment, afin de pouvoir retrouver la physique

Défi 69 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

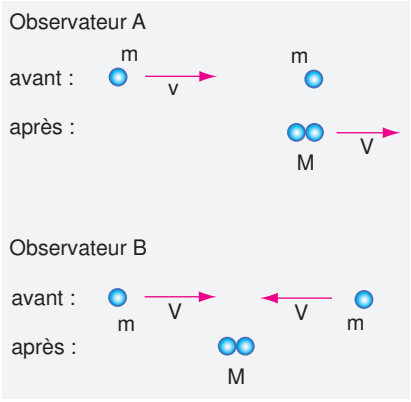


FIGURE 33 Une collision inélastique entre deux particules identiques, observée à partir de deux référentiels inertiels distincts.

galiléenne, la correction relativiste représentée par les facteurs γ_i doit être proche de la valeur 1 pour les vitesses quotidiennes, c'est-à-dire pour les vitesses qui sont très petites devant la vitesse de la lumière.

Même si nous ne connaissons pas la valeur de ce facteur de correction relativiste, nous pouvons la déduire à partir de la collision indiquée sur la Figure 33.

Dans le premier référentiel (A) nous avons $\gamma_v mv = \gamma_V MV$ et $\gamma_v m + m = \gamma_V M$. À partir des observations du second référentiel (B) nous déduisons que la composition de V avec V donne v, en d'autres termes que

Défi 70 e

$$v = \frac{2V}{1 + V^2/c^2} \,. \tag{28}$$

Lorsque ces équations sont combinées, la correction relativiste γ se révèle être dépendante de la grandeur de la vitesse v à travers

$$\gamma_v = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,. \tag{29}$$

À l'aide de cette expression, et d'une généralisation de la physique galiléenne, le rapport des *masses* entre deux particules incidentes est défini comme étant le rapport

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{\Delta(\gamma_2 v_2)}{\Delta(\gamma_1 v_1)} \,. \tag{30}$$

(Nous ne donnons pas ici la définition généralisée de la masse, mentionnée au chapitre sur la mécanique galiléenne, c'est-à-dire celle qui est fondée sur le rapport des accélérations, parce qu'elle contient quelques subtilités que nous découvrirons bientôt.) Les facteurs de correction γ_i assurent que la masse définie par cette équation est la même que celle définie en mécanique galiléenne, et qu'elle reste la même pour tous les types de collisions qu'un corps peut subir*. De cette façon, la masse demeure une quantité

Page 76

* Les résultats qui suivent montrent également que $\gamma = 1 + T/mc^2$, où T représente l'énergie cinétique d'une

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

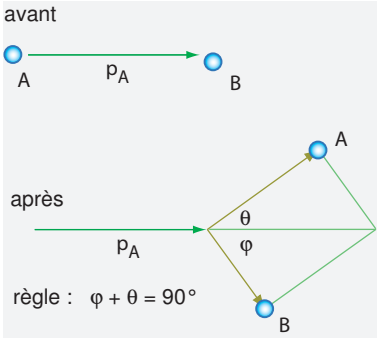


FIGURE 34 Une règle très utile pour jouer au billard non relativiste.

caractérisant la difficulté à accélérer un corps, et elle peut toujours être utilisée pour des *ensembles* de corps.

En suivant l'exemple de la physique galiléenne, nous appelons la quantité

$$\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v} \tag{31}$$

le *vecteur quantité de mouvement relativiste* (*linéaire*) d'une particule. À nouveau, la quantité de mouvement totale est une quantité *conservée* pour tout système n'étant pas sujet à des influences externes, et cette conservation est une conséquence directe de la manière dont la masse est définie.

Pour des vitesses faibles, où $\gamma \approx 1$, la quantité de mouvement relativiste est identique à celle de la physique galiléenne, et est proportionnelle à la vitesse. Mais pour des vitesses élevées, la quantité de mouvement augmente plus vite que la vitesse, convergeant vers l'infini lorsqu'elle s'approche de la vitesse de la lumière.

POURQUOI LE JEU DU BILLARD RELATIVISTE EST PLUS DIFFICILE

Il existe une propriété bien connue qui concerne les collisions entre une sphère ou une particule en mouvement et une autre au repos de *même masse*, et qui est primordiale lorsque nous jouons au billard, ou snooker. À l'issue d'une telle collision, les deux sphères s'en iront en formant un *angle droit* l'une par rapport à l'autre, comme indiqué dans la Figure 34.

Toutefois, les expériences montrent que la règle de l'angle droit ne s'applique *pas* aux collisions relativistes. En fait, en utilisant la conservation de la quantité de mouvement,
Défi 72 e et en faisant preuve d'un peu de dextérité, vous pouvez calculer que

$$\tan\theta \tan\varphi = \frac{2}{\gamma + 1}\,, \tag{32}$$

où les angles sont définis dans la Figure 35. Il apparaît que la somme $\varphi + \theta$ est *plus petite* que l'angle droit dans le cas relativiste. Des vitesses relativistes modifient ainsi complètement la donne au jeu du billard. En réalité, chaque physicien des accélérateurs le sait :

Défi 71 e particule.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

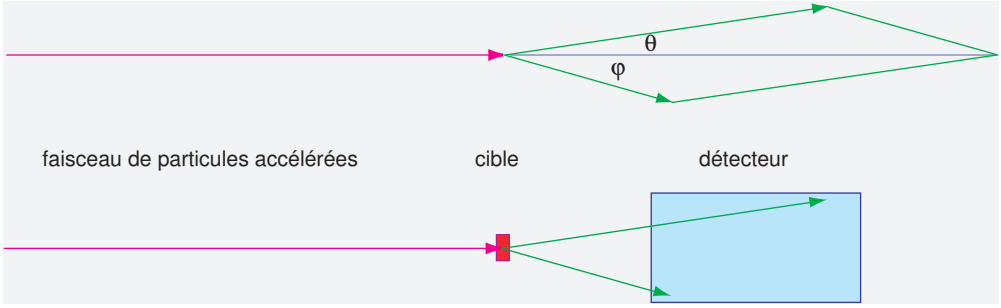


FIGURE 35 Les dimensions des détecteurs dans les accélérateurs de particules sont fondées sur la règle de l'angle du billard relativiste.

pour des électrons ou des protons, ces angles peuvent facilement être déduits à partir des photographies prises dans les chambres à brouillard, lesquelles indiquent les traces laissées par les particules lorsqu'elles les traversent. Toutes ces photographies confirment Réf. 22 l'expression ci-dessus. En fait, les formes des détecteurs sont choisies en fonction de l'expression (32), comme esquissé sur la Figure 35. Si cette formule – et la relativité – était fausse, la plupart de ces détecteurs ne pourraient pas fonctionner, puisqu'ils manqueraient la plupart des particules après la collision. En fait, ces expériences prouvent égale- Défi 73 pe ment la validité de la formule de la composition des vitesses. Pouvez-vous le montrer ?

La masse est de l'énergie concentrée

Revenons à la collision inélastique et colinéaire de la Figure 33. Quelle est la masse M Défi 74 s du système à l'arrivée ? Le calcul montre que

$$M/m = \sqrt{2(1+\gamma_v)} > 2\,. \tag{33}$$

En d'autres termes, la masse du système final est *plus grande* que la somme des deux masses m originales. Par opposition à la mécanique galiléenne, la somme de toutes les masses dans un système *n'est pas* une quantité conservée. Seule la somme $\sum_i \gamma_i m_i$ des masses corrigées est conservée.

La relativité fournit la réponse à cet embarras. Tout rentre dans l'ordre si, pour l'*énergie* E d'un objet de masse m et de vitesse v, nous utilisons l'expression

$$E = \gamma mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\,, \tag{34}$$

en l'appliquant à la fois au système tout entier et à chacun de ses constituants. La conservation de la masse corrigée peut alors être vue comme étant la conservation de l'énergie, simplement sans le facteur c^2. Dans l'exemple des deux masses identiques collées l'une à l'autre, les deux particules sont décrites chacune par la masse et l'énergie, et le système résultant possède une énergie E donnée par la somme des énergies des deux particules. En particulier, il en résulte que l'énergie E_0 d'un corps *au repos* et sa masse m sont reliées

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

par

$$E_0 = mc^2 \,, \tag{35}$$

ce qui est probablement la découverte la plus admirable et la plus célèbre de la physique moderne. Puisque c^2 est si grand, nous pouvons dire que *la masse est de l'énergie concentrée*. En d'autres termes, la relativité restreinte exprime que chaque masse possède de l'énergie, et que chaque forme d'énergie contenue dans un système possède une masse. L'accroissement de l'énergie d'un système entraîne l'augmentation de sa masse, et la diminution du contenu en énergie conduit à une diminution de la masse. En bref, si une bombe explose à l'intérieur d'une boîte fermée, la masse, le poids et la quantité de mouvement de la boîte sont les mêmes avant et après l'explosion, mais la masse cumulée des décombres à l'intérieur de la boîte sera *plus petite* qu'auparavant. Toutes les bombes – pas seulement les nucléaires – tirent donc leur énergie d'une réduction de la masse. De même, chaque action réalisée par un système – tels une caresse, un sourire ou un regard – tire son énergie d'une diminution de la masse.

L'énergie cinétique T est donc donnée par

$$T = \gamma mc^2 - mc^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1\cdot 3}{2\cdot 4}m\frac{v^4}{c^2} + \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6}m\frac{v^6}{c^4} + \ldots \tag{36}$$

Défi 75 e (en utilisant la formule du binôme de Newton) laquelle se réduit à l'expression galiléenne uniquement pour des petites vitesses.

L'équivalence masse–énergie $E = \gamma mc^2$ implique que le prélèvement de *n'importe quelle* énergie sur la matière conduit à une diminution de sa masse. Lorsqu'une personne joue du piano, réfléchit ou court, sa masse décroît. Lorsqu'une tasse de thé refroidit ou qu'une étoile brille, leur masse décroît. L'équivalence masse–énergie s'immisce partout dans la nature.

Par ailleurs, nous devons faire attention de bien distinguer la transformation de la *masse* en énergie de la transformation de la *matière* en énergie. Cette dernière est beau-
Défi 76 s coup plus rare. Pouvez-vous en fournir quelques exemples ?

La relation masse–énergie (34) implique la mort de nombreux récits fantaisistes de science-fiction. Elle signifie qu'il n'existe *pas* de sources d'énergie non découvertes sur ou près de la Terre. Si de telles sources existaient, elles seraient mesurables à travers leur masse. De nombreuses expériences ont recherché de tels effets, et sont toujours en train de le faire, en vain. Il n'y a pas d'énergie gratuite disponible dans la nature*.

La relation masse–énergie $m = E_0/c^2$ implique également que nous avons besoin d'environ 90 mille millions kJ (ou 21 mille millions kcal) pour accroître notre poids d'un seul gramme. Bien entendu, les diététiciens ont des opinions légèrement divergentes sur cette question ! En fait, les êtres humains obtiennent leur énergie quotidienne à partir des substances qu'ils mangent, boivent et respirent en réduisant cette masse cumulée avant de l'expulser. Cependant, ce *défaut de masse chimique* survenant lorsque du combustible est consommé ne peut pas toujours être mesuré en pesant la matière avant et après la réaction : la différence est extrêmement petite, à cause du facteur de conversion impliqué qui

* Il est possible qu'il existe deux formes d'énergie extrêmement diluées et non encore découvertes, que l'on appelle la *matière noire* et (de façon confuse) l'*énergie sombre*, éparpillées partout dans l'univers. Elles sont
Page 201 déduites de mesures de masses (quoique laborieuses). Cette énigme n'a pas encore été résolue.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est énorme. En réalité, pour toutes les réactions chimiques, les énergies de liaison sont d'environ 1 aJ (6 eV) par liaison : cela donne une variation de poids de l'ordre d'une partie pour 10^{10}, trop imperceptible pour être mesurée par des individus qui se pèsent ou pour déterminer les différences de masse entre les aliments et les excréments. Par conséquent, pour des processus chimiques courants, la masse peut être considérée comme étant constante, en accord avec la physique galiléenne.

L'équivalence masse–énergie a été confirmée par toutes les expériences réalisées jusqu'à ce jour. Le procédé de mesure utilisé pour le *défaut de masse nucléaire* est celui qui est le plus simple. L'expérience la plus précise, depuis 2005, a confirmé la relation masse–énergie jusqu'à plus de 6 décimales, en comparant d'une part la différence de masse de noyaux avant et après la capture de neutrons, et d'autre part l'énergie émise par le rayon
Réf. 56 gamma.

Des méthodes modernes de mesure de la masse de molécules uniques ont même permis de mesurer le défaut de masse *chimique*, en comparant la masse d'une seule molécule par rapport à celle de ses atomes constitutifs. Le groupe de David Pritchard a développé les *pièges de Penning*, qui permettent de déterminer les masses à partir des mesures de fréquence. La précision accessible par ces expériences de résonance cyclotron est suffi-
Réf. 57 sante pour confirmer la relation $\Delta E_0 = \Delta m c^2$ pour les liaisons chimiques. À l'avenir, une précision accrue permettra même de déterminer des énergies de liaison de cette manière avec exactitude. Puisque l'énergie de liaison est souvent rayonnée sous forme de lumière, nous pouvons dire que ces techniques modernes permettent de *peser* la lumière.

La première dérivation d'Einstein de la relation masse–énergie était fondée sur la réflexion qu'il mena à propos de la lumière et de sa masse. Lorsqu'un objet émet deux rayons lumineux identiques dans des directions opposées, son énergie décroît de la quantité émise. Puisque les deux rayons lumineux sont identiques en énergie et en quantité de mouvement, le corps ne se déplace pas. Si nous décrivons la même situation du point de vue d'un observateur en mouvement, nous déduisons à nouveau que l'*énergie au repos*
Défi 77 e de cet objet est

$$E_0 = mc^2 \,. \tag{37}$$

En résumé, tous les processus physiques, y compris les collisions, nécessitent un traitement relativiste à chaque fois que l'énergie concernée représente une portion assez importante de l'énergie au repos.

Toute augmentation de l'énergie entraîne une augmentation de la masse. Par conséquent, le fait de chauffer un corps le rend également plus lourd. Cependant, cet effet est si ténu que personne ne l'a mesuré jusqu'à ce jour. C'est un défi pour les expériences futures de pouvoir le réaliser un jour.

Comment l'énergie et la quantité de mouvement sont-elles reliées ? Les définitions de la quantité de mouvement (31) et de l'énergie (34) conduisent à deux relations fondamen-
Défi 78 e tales. En premier lieu, leurs grandeurs sont reliées par

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2 \tag{38}$$

pour tous les systèmes relativistes, qu'ils soient des objets ou, comme nous le verrons ci-après, du rayonnement. Pour le *vecteur* de la quantité de mouvement, nous obtenons

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

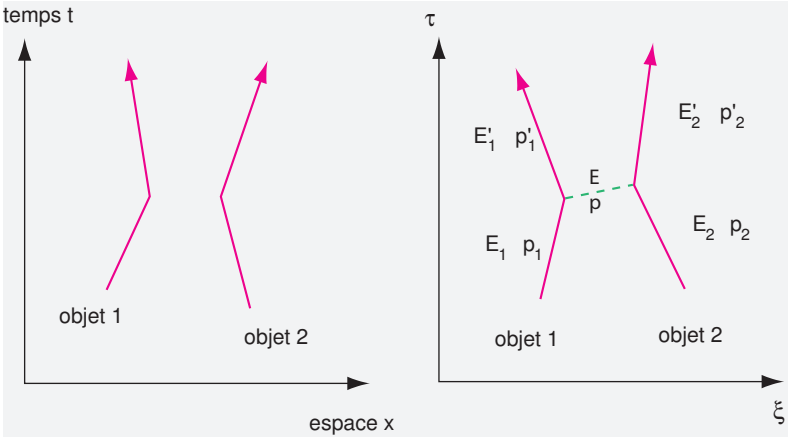


FIGURE 36 Diagramme d'espace-temps d'une collision pour deux observateurs.

l'autre relation importante

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c^2}\mathbf{v}\,, \tag{39}$$

qui est également valide pour *n'importe quel* type d'énergie en mouvement, qu'il soit
Défi 79 e un objet, un rayon ou une pulsation de rayonnement*. Nous utiliserons souvent ces deux relations dans le reste de notre ascension de la Montagne Mouvement, et en particulier dans la discussion qui suit.

Collisions, objets virtuels et tachyons

Nous venons juste de voir que, dans le cas des collisions relativistes, la conservation de l'énergie et celle de la quantité de mouvement totale sont des conséquences implicites de la définition de la masse. Analysons maintenant les collisions plus en détail, en utilisant ces nouveaux concepts. Une *collision* est un processus, c'est-à-dire une succession d'événements, pour lequel

— la quantité de mouvement totale avant l'interaction et après l'interaction reste la même,
— la quantité de mouvement est échangée dans une petite région de l'espace-temps,
— pour des vitesses faibles, la description galiléenne demeure valide.

Dans la vie quotidienne un *choc*, c'est-à-dire une interaction de courte distance, est l'événement par lequel deux objets modifient leur quantité de mouvement. Mais ces deux objets qui se heurtent sont situés en des points *différents* lorsque cela se produit. Une
Réf. 58 collision est par conséquent décrite par un diagramme d'espace-temps tel que celui de gauche dans la Figure 36, évocateur de la constellation d'Orion. Il est facile de vérifier que le processus décrit par un tel diagramme est une collision en accord avec la définition
Défi 80 e donnée ci-dessus.

La partie droite de la Figure 36 représente le même processus vu dans un autre référentiel, grec. L'observateur grec affirme que le premier objet a modifié sa quantité de

* En notation quadrivectorielle, nous pouvons écrire $v/c = \mathbf{P}/P_0$, où $P_0 = E/c$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mouvement *avant* le second. Cela signifie que durant un court intervalle de temps l'énergie et la quantité de mouvement ne seraient *pas* conservées !

La seule manière de donner un sens à cette situation est de supposer qu'il y a échange d'un troisième objet, représenté par une ligne en pointillés. Découvrons quelles sont les propriétés de ce troisième objet. Si nous notons les masses, les énergies et les quantités de mouvement des deux corps à l'aide d'un indice numérique inférieur, et si nous les
Défi 81 e notons prime après la collision, la masse inconnue m vérifie

$$m^2c^4 = (E_1 - E_1')^2 - (p_1 - p_1')^2c^2 = 2m_1^2c^4 - 2E_1E_1'\left(\frac{1 - v_1v_1'}{c^2}\right) < 0\,. \qquad (40)$$

C'est un résultat étrange, parce qu'il signifie que la masse inconnue est un nombre *imaginaire** ! Par-dessus tout, nous voyons aussi tout de suite, d'après le deuxième graphique, que l'objet échangé avance plus vite que la lumière. C'est un *tachyon*, d'après le mot grec ταχύς « rapide ». En d'autres termes, les collisions impliquent l'existence d'un mouvement plus rapide que la lumière ! Nous verrons plus tard que les collisions sont en réalité les *seuls* processus où les tachyons jouent un rôle dans la nature. Puisque les objets échangés n'apparaissent que pendant les collisions, et jamais en tant que tels, ils sont appelés des objets *virtuels*, pour les distinguer des objets *réels* usuels, et peuvent se déplacer librement sans aucune restriction**. Nous étudierons leurs propriétés un peu plus tard, lorsque nous viendrons à discuter de la théorie quantique.

Dans la nature, un tachyon est toujours un objet virtuel. Les objets réels sont des *bradyons* – d'après la racine grecque βραδύς « lent » – ou objets se déplaçant moins vite que la lumière. Remarquez d'une part que les tachyons, en dépit de leur extrême célérité, n'autorisent pas un transport de l'énergie qui soit plus rapide que la lumière, et d'autre part qu'ils ne violent pas le principe de causalité si, et seulement si, ils sont émis ou
Défi 82 pe absorbés avec une probabilité identique. Pouvez-vous confirmer tout cela ?

Lorsque nous étudierons la théorie quantique, nous découvrirons également qu'une interaction de contact entre des objets est décrite en général non par l'échange d'un *unique* objet virtuel, mais par un *flux* continu de particules virtuelles. Pour des collisions courantes entre des objets familiers, l'interaction se révèle être d'origine électromagnétique. Dans ce cas, les particules échangées sont des photons virtuels. En d'autres termes, quand notre main touche une autre main, quand elle pousse une pierre, ou quand une montagne soutient les arbres qui poussent sur ses flancs, des flux de photons virtuels sont
Page ?? continuellement échangés.

* Il est courant de modifier les relations masse–énergie et masse–quantité de mouvement des tachyons en $E = \pm mc^2/\sqrt{v^2/c^2 - 1}$ et $p = \pm mv/\sqrt{v^2/c^2 - 1}$: cela revient à redéfinir m. Après cette redéfinition, les tachyons possèdent une masse *réelle*. Les relations de l'énergie et de la quantité de mouvement montrent que les tachyons perdent de l'énergie et de la quantité de mouvement lorsqu'ils vont plus vite. (De façon déconcertante, un unique tachyon situé dans une boîte pourrait nous fournir toute l'énergie que nous souhaiterions.) Les deux signes pour ces relations de l'énergie et de la quantité de mouvement doivent être maintenus, parce que sinon l'équivalence entre tous les observateurs inertiels ne serait pas vérifiée. Les tachyons ne possèdent donc pas une énergie minimale ou une quantité de mouvement minimale.

** Plus précisément, une particule virtuelle n'obéit pas à la relation $m^2c^4 = E^2 - p^2c^2$, valide pour les particules réelles.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

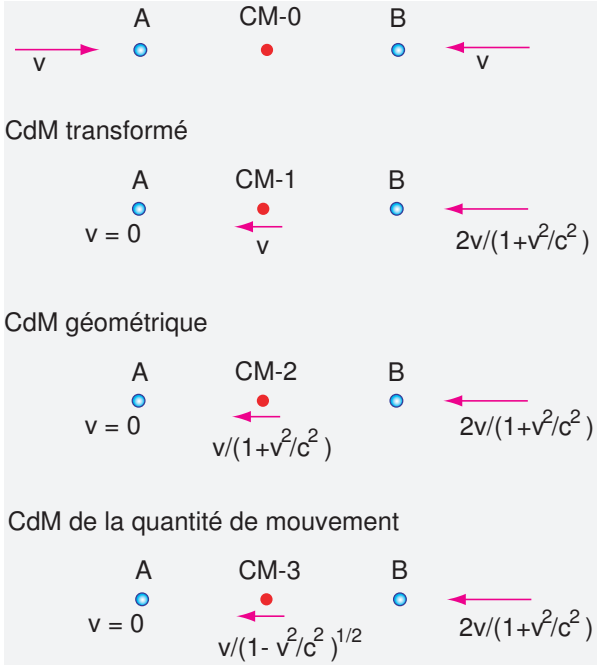


FIGURE 37 Il n'existe aucune manière de définir un centre de masse relativiste.

Il existe un autre secret dissimulé dans les collisions. Dans la partie droite de la Figure 36, le tachyon est émis par le premier objet et absorbé par le second. Toutefois, il est facile d'imaginer un observateur pour lequel la situation opposée se produit. En bref, la direction de la trajectoire d'un tachyon dépend de l'observateur ! En réalité, c'est une allusion à l'*antimatière*. Dans les diagrammes d'espace-temps, la matière et l'antimatière voyagent dans des directions opposées. Le lien entre la relativité et l'antimatière deviendra également plus flagrant dans la théorie quantique.

Défi 83 s

Page ??

Systèmes de particules – absence de centre de masse

La relativité nous oblige également à abandonner le concept de *centre de masse* qui nous est cher. Nous pouvons déjà le remarquer en prenant l'exemple le plus simple possible : celui de deux objets identiques qui se heurtent.

La Figure 37 montre que, à partir du point de vue où une des deux particules incidentes est au repos, il existe au moins trois manières différentes pour définir le centre de masse. En d'autres termes, le centre de masse n'est pas un concept invariant par rapport à l'observateur. Nous pouvons déduire à partir de la figure que cette notion a un sens uniquement pour des systèmes dont les constituants se déplacent avec des vitesses *faibles* les uns par rapport aux autres. Pour des systèmes plus généraux, le centre de masse n'est pas définissable de manière unique. Cela représentera-t-il une entrave dans notre ascension ? Non. Nous sommes plus attachés au mouvement de particules prises séparément qu'à celui d'objets ou de systèmes composés.

Réf. 59

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

POURQUOI LA PLUPART DES MOUVEMENTS SONT-ILS SI LENTS ?

Pour la plupart des systèmes courants, les intervalles de temps mesurés par deux observateurs distincts sont pratiquement égaux ; ce n'est que pour des vitesses relatives élevées, typiquement de plus de quelques pour cent de la vitesse de la lumière, qu'une différence perceptible se fait ressentir. La plupart de ces situations sont microscopiques. Nous avons déjà mentionné le cas des électrons à l'intérieur du tube d'un téléviseur ou dans un accélérateur de particules. Les particules issues des rayons cosmiques en sont un autre exemple : leur énergie phénoménale a entraîné un grand nombre de mutations qui sont à la base de l'évolution des animaux et des plantes sur notre planète. Nous découvrirons plus loin que les particules impliquées dans la radioactivité sont également relativistes.

Mais pourquoi n'observons-nous jamais de corps *macroscopique* rapide ? Des corps mobiles, y compris des observateurs, ayant des vitesses relativistes possèdent une propriété qu'on ne rencontre pas dans la vie quotidienne : lorsqu'ils sont impliqués dans une collision, une partie de leur énergie est convertie en matière nouvelle via $E = \gamma mc^2$. Dans l'histoire du cosmos cela est survenu si fréquemment que pratiquement tous les corps qui sont demeurés en mouvement relativiste sont des particules microscopiques.

Une deuxième raison qui explique la disparition du mouvement relativement rapide est l'amortissement par rayonnement. Pouvez-vous imaginer ce qui survient aux charges électriques pendant les collisions, ou dans un bain de lumière ?

Défi 84 s

En résumé, presque toute la matière contenue dans l'univers se déplace à des vitesses relativement petites par rapport à la matière restante. Les quelques contre-exemples connus sont soit très anciens, comme les jets issus des quasars déjà mentionnés, soit cessent après un court laps de temps. Les énergies colossales nécessaires pour le mouvement relativiste macroscopique sont toujours rencontrées dans les explosions de supernovae, mais elles cessent d'exister après quelques semaines seulement. Finalement, l'univers est principalement empli de mouvement lent parce qu'il est *vieux*. Nous déterminerons son âge bientôt.

Page 210

L'HISTOIRE DE LA FORMULE DE L'ÉQUIVALENCE MASSE–ÉNERGIE DE DE PRETTO ET EINSTEIN

Il a fallu plusieurs mois à Albert Einstein, après la parution de son premier article sur la relativité restreinte, avant de déduire l'expression

$$E = \gamma mc^2 \tag{41}$$

laquelle est souvent considérée comme étant la plus célèbre formule de la physique. Il la publia dans un deuxième article indépendant vers la fin de l'an 1905. Indubitablement, cette formule aurait pu être révélée une trentaine d'années plus tôt, à partir de la théorie de l'électromagnétisme.

Réf. 11

En fait, au moins une personne déduisit ce résultat avant Einstein. En 1903 et 1904, *avant* le premier article d'Einstein sur la relativité, un ingénieur italien peu connu, Olinto De Pretto, fut le premier à calculer, discuter et publier la formule $E = mc^2$*. Il se pourrait qu'Einstein ait eu cette idée à partir de la formule de De Pretto, probablement

* Umberto Bartocci, professeur de mathématiques à l'université de Pérouse en Italie, publia les détails de cette surprenante histoire dans plusieurs articles. Le récit complet se trouve dans son ouvrage UM-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

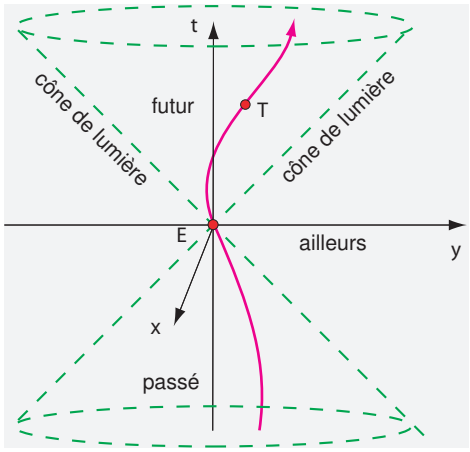


FIGURE 38 Le diagramme d'espace-temps d'un objet mobile T.

par le biais de Michele Besso, un de ses amis, ou d'autres amis de langue italienne qu'il avait rencontrés lorsqu'il rendait visite à ses parents, qui habitaient en Italie à l'époque. Bien sûr, l'importance des efforts d'Einstein n'en est pas diminuée pour autant.

En fait, une formule similaire avait également été déduite en 1904 par Friedrich Hasenöhrl et publiée encore une fois dans *Annalen der Physik* en 1905, avant Einstein, quoique avec un facteur numérique erroné, à cause d'une erreur de calcul. La formule $E = mc^2$ constitue également une partie des diverses expressions situées dans deux publications d'Henri Poincaré en 1900. Le véritable héros de l'histoire pourrait aussi bien être Tolver Preston, qui dissertait déjà sur l'équivalence entre la masse et l'énergie en 1875, dans son livre *Physics of the Ether*. L'équivalence masse–énergie flottait donc en réalité dans l'air du temps, attendant tout simplement d'être révélée.

Réf. 60

Dans les années 1970, il y eut une histoire similaire : une relation élémentaire entre l'accélération gravitationnelle et la température du vide fut mise en lumière. Ce résultat avait attendu pendant plus de 50 ans avant d'être découvert. En réalité, un grand nombre de résultats similaires et antérieurs étaient consignés dans la littérature. D'autres relations élémentaires pourraient-elles être cachées dans la physique moderne, attendant d'être révélées ?

Défi 85 s

QUADRIVECTEURS

Pour décrire le mouvement de manière cohérente pour *tous* les observateurs, nous devons introduire quelques nouveaux objets mathématiques. Avant tout, le mouvement des particules est perçu comme étant une succession d'événements. Pour décrire les événements avec précision, nous utilisons des coordonnées événementielles, également appelées éléments à *quatre coordonnées*. Ils sont notés comme suit

$$\mathbf{X} = (ct, \mathbf{x}) = (ct, x, y, z) = X^i \,. \tag{42}$$

BERTO BARTOCCI, *Albert Einstein e Olinto De Pretto : la vera storia della formula più famosa del mondo*, Ultreja, 1998.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

De cette manière, un événement est un point dans l'espace-temps quadridimensionnel et est décrit par quatre coordonnées. Les coordonnées sont énumérées ainsi : celui d'indice zéro, à savoir le temps $X^0 = ct$, d'indice 1, généralement $X^1 = x$, d'indice 2, $X^2 = y$, et d'indice 3, $X^3 = z$. Nous pouvons alors définir une *distance d* entre des événements comme étant la longueur du vecteur différence. En fait, nous utilisons généralement le carré de la longueur, pour éviter ces racines carrées peu maniables. En relativité restreinte, la grandeur (« longueur au carré ») d'un vecteur est toujours définie par

$$\mathbf{XX} = {X_0}^2 - {X_1}^2 - {X_2}^2 - {X_3}^2 = ct^2 - x^2 - y^2 - z^2 = X_a X^a = \eta_{ab} X^a X^b = \eta^{ab} X_a X_b \ . \quad (43)$$

Dans cette équation nous avons introduit pour la première fois deux notations qui sont utiles en relativité. En premier lieu, nous sommons automatiquement et implicitement sur les indices répétés. Ainsi, $X_a X^a$ représente la somme de tous les produits $X_a X^a$ si a est un indice qui prend toutes les valeurs de l'intervalle. Deuxièmement, pour chaque quadrivecteur $\mathbf{X}$ nous discernons deux manières d'écrire les coordonnées, à savoir les coordonnées avec les indices en position haute et les coordonnées avec les indices en position basse. (En trois dimensions, nous utilisons uniquement des indices inférieurs.) Elles sont reliées par la relation générale

$$X_a = \eta_{ab} X^b = (ct, -x, -y, -z) \ , \quad (44)$$

où nous avons introduit la *métrique* η^{ab}, une abréviation de la matrice*

$$\eta^{ab} = \eta_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \quad (45)$$

Ne paniquez pas : ce sera tout, et ce ne sera pas plus compliqué ! Revenons maintenant à la physique.

La grandeur d'un vecteur position, ou distance, également nommé *intervalle* d'espace-temps, est essentiellement égale au temps propre multiplié par c. Le *temps propre* est le temps indiqué par une horloge se déplaçant en ligne droite et avec une vitesse constante depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée dans l'espace-temps. La différence par rapport aux vecteurs classiques (trivecteurs) est que la grandeur de l'intervalle peut être positive, négative ou même nulle. Par exemple, si les points de départ et d'arrivée dans l'espace-temps réclament un mouvement à la vitesse de la lumière, le temps propre est nul (cela est requis pour des vecteurs nuls). Si le mouvement est plus lent que la vitesse de la lumière, le temps propre au carré est positif et la distance est du genre temps. Pour des intervalles négatifs et donc des temps propres imaginaires, la distance est du genre espace**. Un tour d'horizon simplifié en est donné par la Figure 38.

Page 40

* Remarquez que 30 % de tous les manuels de physique emploient la valeur négative de η pour la métrique, ce que l'on appelle la *convention de genre espace*, et emploient donc des signes opposés à cette définition. Dans ce texte, comme dans les 70 % des textes de physique, nous utilisons la *convention de genre temps*.

** Dans le dernier cas, la valeur négative de la grandeur, laquelle est un nombre positif, est appelée la *distance*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nous sommes maintenant capables de calculer et de mesurer le mouvement en quatre dimensions. Les mesures sont fondées sur une seule idée centrale. Nous ne pouvons pas définir la vitesse d'une particule comme la dérivée de ses coordonnées par rapport au temps, puisque le temps et les intervalles de temps dépendent de l'observateur. La solution consiste à définir toutes les observables en fonction du *temps propre* τ mentionné juste ci-dessus, qui est défini comme étant le temps indiqué par une horloge attachée à l'objet. En relativité, le mouvement et le changement sont toujours mesurés par rapport à des horloges fixées au système en mouvement. En particulier, la *vitesse relativiste* ou *quadrivitesse* **U** d'un corps est définie comme étant la variation infinitésimale des *quatre coordonnées*, ou coordonnées événementielles, $\mathbf{X} = (ct, \mathbf{x})$ par rapport au temps propre, c'est-à-dire comme

$$\mathbf{U} = \mathrm{d}\mathbf{X}/\mathrm{d}\tau \,. \tag{46}$$

Les coordonnées **X** sont mesurées dans le système de coordonnées défini par l'observateur inertiel choisi. La valeur de la vitesse **U** dépend de l'observateur ou du système de coordonnées utilisé ; ainsi la vitesse dépend de l'observateur, comme c'est le cas dans la vie quotidienne. En utilisant $\mathrm{d}t = \gamma\,\mathrm{d}\tau$ et donc

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \gamma\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \quad \text{, où comme d'habitude} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\,, \tag{47}$$

nous obtenons la relation avec la vitesse classique $\mathbf{v} = \mathrm{d}\mathbf{x}/\mathrm{d}t$:

$$u^0 = \gamma c\,,\ u^i = \gamma v_i \quad \text{ou} \quad \mathbf{U} = (\gamma c, \gamma\mathbf{v})\,. \tag{48}$$

Pour des vitesses faibles nous avons $\gamma \approx 1$, et donc les trois dernières composantes de la quadrivitesse sont celles de la vitesse galiléenne usuelle. Pour la norme de la quadrivitesse **U** nous trouvons $\mathbf{UU} = U_a U^a = \eta_{ab} U^a U^b = c^2$, qui est par conséquent indépendant de la norme de la vitesse **v** et fait de celui-ci un vecteur de genre temps, c'est-à-dire un vecteur situé *à l'intérieur* du cône de lumière*.

Remarquez que la grandeur d'un quadrivecteur peut être nulle bien que toutes ses composantes soient différentes de zéro. Un tel vecteur est qualifié de *nul*. Quels mouve-
Défi 87 s ments possèdent un vecteur vitesse nul ?

propre au carré. La distance propre est la longueur mesurée par un odomètre si l'objet se déplace avec celui-ci.

* En général, un *quadrivecteur* est défini comme étant une quantité (h_0, h_1, h_2, h_3) qui se transforme de la manière suivante

$$\begin{aligned} h'_0 &= \gamma_V (h_0 - h_1 V/c) \\ h'_1 &= \gamma_V (h_1 - h_0 V/c) \\ h'_2 &= h_2 \\ h'_3 &= h_3 \end{aligned} \tag{49}$$

quand on passe d'un observateur inertiel à un autre se déplaçant avec une vitesse relative V dans la direction x. Les généralisations correspondantes pour les autres coordonnées peuvent en être déduites. Cette relation nous permet d'inférer les lois de transformation pour n'importe quel trivecteur. Pouvez-vous déduire la
Défi 86 s formule de composition des vitesses (9) à partir de cette définition, en l'appliquant à la quadrivitesse ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

De manière identique, l'*accélération relativiste* ou *quadri-accélération* **B** d'un corps est définie comme suit

$$\mathbf{B} = \mathrm{d}\mathbf{U}/\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}^2\mathbf{X}/\mathrm{d}\tau^2 \ . \tag{50}$$

En utilisant $\mathrm{d}\gamma/\mathrm{d}\tau = \gamma\mathrm{d}\gamma/\mathrm{d}t = \gamma^4\mathbf{va}/c^2$, nous obtenons les relations suivantes entre les
Réf. 61 quatre composantes de **B** et l'accélération $\mathbf{a} = \mathrm{d}\mathbf{v}/\mathrm{d}t$:

$$B^0 = \gamma^4\frac{\mathbf{va}}{c} \quad , \quad B^i = \gamma^2 a_i + \gamma^4\frac{(\mathbf{va})v_i}{c^2} \ . \tag{51}$$

La grandeur b de la quadri-accélération est facilement retrouvée via $\mathbf{BB} = \eta_{cd}B^cB^d = -\gamma^4(a^2+\gamma^2(\mathbf{va})^2/c^2) = -\gamma^6(a^2-(\mathbf{v}\times\mathbf{a})^2/c^2)$. Remarquez qu'elle dépend de la valeur de l'accélération **a**. La grandeur de la quadri-accélération est aussi appelée l'accélération *propre* car $\mathbf{B}^2 = -a^2$ si $v = 0$. (Quel est le rapport qui existe entre la quadri-accélération et
Défi 88 s la tri-accélération pour un observateur se déplaçant à la même vitesse que l'objet ?) Nous notons que la quadri-accélération se trouve *à l'extérieur* du cône de lumière, c'est-à-dire qu'il est un vecteur de genre espace, et que $\mathbf{BU} = \eta_{cd}B^cU^d = 0$, ce qui signifie que la quadri-accélération est toujours perpendiculaire à la quadrivitesse*. Nous remarquons également que les accélérations, contrairement aux vitesses, ne peuvent pas être qualifiées de relativistes : la différence entre b_i et a_i, ou entre leurs deux normes, ne dépend pas de la valeur de a_i, mais uniquement de la valeur de la vitesse v. En d'autres termes, les accélérations nécessitent un traitement relativiste seulement lorsque les vitesses impliquées sont relativistes. Si les vitesses concernées sont faibles, les plus fortes accélérations peuvent quand même être traitées à l'aide des méthodes galiléennes.

Quand l'accélération **a** est parallèle à la vitesse **v**, nous obtenons $B = \gamma^3 a$, quand **a** est perpendiculaire à **v**, comme dans le cas du mouvement circulaire, nous obtenons $B = \gamma^2 a$.
Page 79 Nous réutiliserons ce résultat plus loin.

Quantité de mouvement relativiste

Pour décrire le mouvement, nous avons également besoin du concept de quantité de mouvement. La *quantité de mouvement relativiste* ou *quadri-impulsion*** est définie par

$$\mathbf{P} = m\mathbf{U} \tag{54}$$

* De façon similaire, le *jerk relativiste* (dérivée de l'accélération par rapport au temps) ou *quadri-jerk* **J** d'un corps est défini par

$$\mathbf{J} = \mathrm{d}\mathbf{B}/\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}^2\mathbf{U}/\mathrm{d}\tau^2 \ . \tag{52}$$

Défi 89 e Pour la relation avec le tri-jerk $\mathbf{j} = \mathrm{d}\mathbf{a}/\mathrm{d}t$ nous obtenons alors

$$\mathbf{J} = (J^0, J^i) = \left(\frac{\gamma^5}{c}(\mathbf{jv} + a^2 + 4\gamma^2\frac{(\mathbf{va})^2}{c^2}) \ , \ \gamma^3 j_i + \frac{\gamma^5}{c^2}((\mathbf{jv})v_i + a^2v_i + 4\gamma^2\frac{(\mathbf{va})^2v_i}{c^2} + 3(\mathbf{va})a_i)\right) \tag{53}$$

Défi 90 pe que nous utiliserons un peu plus tard. De façon étonnante, **J** ne s'annule pas lorsque **j** s'annule. Pourquoi ?

** Comme nous l'avons déjà souligné dans le premier chapitre, le terme impulsion est utilisé abusivement en relativité pour désigner la quantité de mouvement (quadri-impulsion, impulsion–énergie, etc.) : en toute rigueur, il faudrait dire quadri-quantité de mouvement et quantité de mouvement–énergie. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

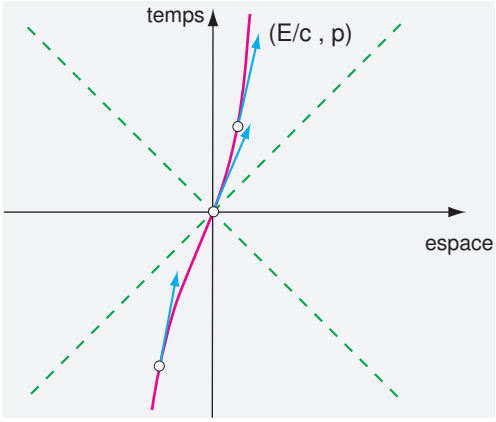


FIGURE 39 L'impulsion–énergie est tangente à la ligne d'univers.

et est par conséquent associée à la quantité de mouvement **p** par

$$\mathbf{P} = (\gamma mc, \gamma m\mathbf{v}) = (E/c, \mathbf{p}) \,. \tag{55}$$

Pour cette raison la quantité de mouvement relativiste est également appelée *quadrivecteur impulsion–énergie*. En bref, *la quantité de mouvement relativiste d'un corps est donnée par sa masse multipliée par le quadri-déplacement par unité de temps propre*. C'est la définition la plus simple possible de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ce concept fut introduit par Max Planck en 1906. Le quadrivecteur impulsion–énergie, appelé également *4-moment*, est *tangent* à la ligne d'univers d'une particule, de même que la quadrivitesse. Cette correspondance, indiquée dans la Figure 39, découle directement de la définition, puisque

$$(E/c, \mathbf{p}) = (\gamma mc, \gamma m\mathbf{v}) = m(\gamma c, \gamma \mathbf{v}) = m(\mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau, \mathrm{d}\mathbf{x}/\mathrm{d}\tau) \,. \tag{56}$$

La longueur (au carré) du 4-moment, à savoir $\mathbf{PP} = \eta_{ab} P^a P^b$, est par définition la même pour tous les observateurs inertiels, on montre qu'elle vaut

$$E^2/c^2 - p^2 = m^2 c^2 \,, \tag{57}$$

confirmant ainsi un résultat donné plus haut. Nous avons déjà mentionné que des énergies ou des situations sont qualifiées de *relativistes* si l'énergie cinétique $T = E - E_0$ n'est pas négligeable lorsque nous la comparons à l'énergie au repos $E_0 = mc^2$. Une particule dont l'énergie cinétique est beaucoup plus élevée que sa masse inertielle est dite *ultra-relativiste*. Les particules rencontrées dans les accélérateurs ou dans les rayons cosmiques tombent dans cette catégorie. (Quelle est leur relation impulsion–énergie ?)

Défi 91 s

Par opposition à la mécanique galiléenne, la relativité suggère l'existence d'un zéro absolu pour l'énergie. Nous ne pouvons pas extraire plus d'énergie que mc^2 d'un système ou d'une masse m. En particulier, une valeur nulle pour l'énergie potentielle est fixée de cette manière. En bref, la relativité indique que l'énergie est limitée par le bas.

Remarquez que par le mot « masse » m nous voulons toujours parler de ce que nous

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dénommons parfois la *masse inertielle*. Ce nom dérive de la mauvaise habitude de nombreuses sciences-fictions et des manuels de l'enseignement secondaire à appeler le produit γm une *masse relativiste*. Les chercheurs dans ce domaine rejettent généralement (mais pas à l'unanimité) ce point de vue, comme le fit Einstein lui-même, et ils réfutent également l'expression « la masse (relativiste) augmente avec la vitesse », que l'on entend souvent. La masse relativiste et l'énergie seraient alors deux manières d'exprimer la même chose : cette façon de s'exprimer est du ressort de la presse à sensation.

Réf. 62

Toute l'énergie galiléenne ne contribue pas forcément à la masse. Par exemple, l'énergie potentielle d'un champ externe n'y participe pas. La relativité nous oblige à tenir une comptabilité précise de l'énergie. L'« énergie potentielle » en relativité est une forme raccourcie pour dire « la réduction d'énergie du champ externe ».

Pouvez-vous montrer que, pour deux particules de quantités de mouvement P_1 et P_2, nous avons $P_1P_2 = m_1E_2 = M_2E_1 = c^2\gamma v_{12}m_1m_2$, où v_{12} est leur vitesse relative ?

Défi 92 s

Quadriforce

La quadriforce **K** est définie par

$$\mathbf{K} = \mathrm{d}\mathbf{P}/\mathrm{d}\tau = m\mathbf{B} \,. \tag{58}$$

Par conséquent, en relativité, la force reste égale à la masse fois l'accélération. À partir de la définition de **K** nous déduisons la relation avec la force classique $\mathbf{f} = \mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}t = m\mathrm{d}(\gamma\mathbf{v})/\mathrm{d}t$, à savoir*

Réf. 61, Réf. 63

$$\mathbf{K} = (K^0, K^i) = (\gamma^4 m\mathbf{va}/c, \gamma^2 m a_i + \gamma^4 v_i \frac{m\mathbf{va}}{c^2}) = (\frac{\gamma}{c}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}, \gamma\frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t}) = (\gamma\frac{\mathbf{fv}}{c}, \gamma\mathbf{f}) \,. \tag{59}$$

La quadriforce, comme la quadri-accélération, est perpendiculaire à la quadrivitesse. La signification de la composante d'indice zéro de la quadriforce peut facilement être distinguée : c'est la *puissance* requise pour accélérer l'objet. Nous avons $\mathbf{KU} = c^2\mathrm{d}m/\mathrm{d}\tau = \gamma^2(\mathrm{d}E/\mathrm{d}t - \mathbf{fv})$: c'est le rapport adéquat par lequel l'énergie interne d'un système augmente. Le produit **KU** s'annule uniquement pour des forces qui conservent la masse inertielle. Les collisions de particules qui conduisent à des réactions n'appartiennent pas à cette classe. Dans la vie quotidienne, la masse inertielle est conservée, et nous obtenons alors l'expression galiléenne $\mathbf{fv} = \mathrm{d}E/\mathrm{d}t$.

Défi 94 e

La rotation en relativité

Si, la nuit, nous tournons sur nous-mêmes tout en regardant le ciel, les astres bougent avec une vitesse beaucoup plus élevée que celle de la lumière. La majorité des étoiles sont des masses, pas des images. Leur vitesse devrait être limitée par celle de la lumière. Comment tout cela s'accorde-t-il avec la relativité restreinte ?

* Certains auteurs définissent la tri-force comme $\mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}\tau$, **K** s'écrit alors de manière légèrement différente. Dans tous les cas, il est important de remarquer qu'en relativité la tri-force $\mathbf{f} = \mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}t$ est en réalité proportionnelle à la tri-accélération **a**. Toutefois, la force et l'accélération ne sont pas parallèles l'une à l'autre. En fait, pour des forces préservant la masse inertielle, nous trouvons $\mathbf{f} = \gamma m\mathbf{a} + (\mathbf{fv})\mathbf{v}/c^2$. Au contraire, en relativité la tri-impulsion n'est *pas* proportionnelle à la tri-vitesse, bien qu'elle soit parallèle à celle-ci.

Défi 93 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

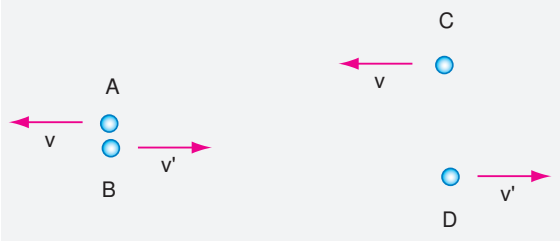


FIGURE 40 Sur la définition de la vitesse relative.

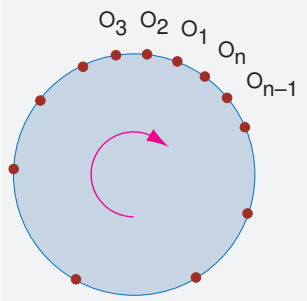


FIGURE 41 Observateurs sur un objet en rotation.

Cet exemple aide à éclaircir, d'une autre manière, ce qu'est réellement la vitesse limite. Physiquement parlant, une voûte céleste en rotation ne permet *pas* le transport d'énergie supraluminique, et donc ne contredit pas l'idée de vitesse limite. Mathématiquement parlant, la vitesse de la lumière restreint les vitesses relatives *uniquement* entre des objets qui sont *proches* les uns des autres, comme indiqué sur la partie gauche de la Figure 40. Comparer des vitesses entre des objets éloignés n'est possible que si toutes les vitesses concernées sont constantes au cours du temps, ce qui n'est pas le cas dans notre exemple. La version différentielle des transformations de Lorentz rend ce point particulièrement évident. Dans un grand nombre de situations générales, les vitesses relatives entre des objets *éloignés* peuvent être supérieures à la vitesse de la lumière. Nous en avons déjà rencontré un exemple lors de la discussion sur la voiture dans le tunnel, et nous rencontrerons bientôt quelques exemples supplémentaires.

Page 53
Page 86

Avec cet éclaircissement, nous pouvons dorénavant considérer succinctement la *rotation* en relativité. La première question est de savoir comment les longueurs et les durées varient dans un référentiel en rotation. Vous devriez pouvoir vérifier qu'un observateur situé dans un référentiel en rotation s'accorde avec un collègue, qui n'est pas en rotation, situé sur l'axe d'un corps en rotation. Cependant tous les deux remarquent que le corps en rotation, même s'il est rigide, possède une circonférence *différente* de celle qu'il avait avant de commencer à tourner. Grossièrement dit, la valeur de π *change* pour des observateurs en rotation. Le rapport entre la circonférence c et le rayon r se révèle être $c/r = 2\pi\gamma$: il augmente avec la vitesse de rotation. Cette conséquence non intuitive est souvent appelée le *paradoxe d'Ehrenfest*. Par-dessus tout, elle indique que l'espace-temps pour un observateur situé sur un disque en rotation n'est *pas* l'espace-temps de Minkowski de la relativité restreinte.

Défi 95 e
Défi 96 e
Réf. 64

Les corps en rotation se comportent de façon étrange pour plusieurs raisons. Par

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

exemple, nous éprouvons des difficultés lorsque nous tentons de synchroniser des horloges disposées sur un disque qui tourne, comme indiqué sur la Figure 41. Si nous commençons par synchroniser l'horloge située en O_2 avec celle en O_1, et ainsi de suite, en continuant jusqu'à l'horloge O_n, nous remarquons que la dernière horloge n'est *pas* synchronisée avec la première. Ce résultat est le reflet du changement dans la circonférence cité ci-dessus. En fait, une étude attentive montre que les mesures de longueur et de durée amènent tous les observateurs O_k à conclure qu'ils vivent dans un espace-temps en rotation. Les disques tournants peuvent ainsi être utilisés comme une introduction à la relativité générale, dans laquelle cette courbure et ses conséquences forment le thème central. Nous en dirons plus à ce propos dans le prochain chapitre.

La vitesse angulaire est-elle limitée ? Oui : la vitesse tangentielle dans un référentiel inertiel ne peut excéder celle de la lumière. Cette limite dépend donc de la *taille* du corps en question, ce qui nous conduit à une énigme simple : pouvons-nous *voir* des objets tournant très rapidement ?

Défi 97 pe

On dit que le moment cinétique relativiste est naturellement défini comme suit :

$$l^{ab} = x^a p^b - x^b p^a \,. \tag{60}$$

En d'autres termes, le moment cinétique relativiste est un *tenseur*, et non un vecteur, comme indiqué par ses deux indices. Le moment cinétique est conservé en relativité restreinte. Le moment d'inertie est ainsi logiquement défini comme étant le facteur de proportionnalité entre la vitesse angulaire et le moment cinétique.

Défi 98 pe

Certes, pour une particule en rotation, l'énergie rotationnelle représente une fraction de la masse inertielle. Vous devriez pouvoir calculer la fraction qu'elle représente pour la Terre et le Soleil. Elle n'est pas si élevée. Par ailleurs, comment feriez-vous pour déterminer si une particule microscopique, trop petite pour être observée, est en rotation ?

Défi 99 pe

Défi 100 pe

Dans la théorie de la relativité, la rotation et la translation se combinent de manière surprenante. Imaginez un cylindre en rotation uniforme le long de son axe, telle qu'elle apparaît pour un observateur au repos. Comme l'avait affirmé Max von Laue, le cylindre sera *déformé* pour un observateur avançant le long de l'axe de rotation. Pouvez-vous confirmer ce point ?

Défi 101 e

Maintenant, un dernier problème concernant la rotation. La vitesse est relative : cela signifie que la valeur mesurée dépend de l'observateur. Est-ce le cas également pour la vitesse angulaire ?

Défi 102 pe

Mouvement ondulatoire

En physique galiléenne, une onde est décrite par un vecteur d'onde et par une fréquence. En relativité restreinte, les deux sont combinés en un quadrivecteur d'onde, donné par

$$\mathbf{L} = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{\omega}{c}, \mathbf{n}\right) , \tag{61}$$

où λ représente la longueur d'onde, ω la fréquence angulaire de l'onde et $\mathbf{n}$ le vecteur normal dans la direction de propagation. Supposons qu'un observateur ayant une qua-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

drivitesse **U** observe qu'une onde **L** possède une fréquence ν. Montrez que

$$\nu = \mathbf{LU} \tag{62}$$

Défi 103 pe doit être vérifié. De façon intéressante, la vitesse angulaire ω de l'onde se transforme
Réf. 16 d'une manière différente de la vitesse d'une particule, sauf dans le cas où $\omega = c$. La formule de l'aberration pour le mouvement ondulatoire diffère également de celle des
Défi 104 pe particules, excepté dans le cas $\omega = c$.

Action d'une particule libre – comment les choses bougent-elles ?

Si nous désirons exposer le mouvement relativiste d'une particule libre en termes de
Page 173 principe extrémal, nous avons besoin d'une définition de l'action. Nous savons déjà que l'action physique est une mesure du changement qui intervient dans un système. Pour une particule libre ou en mouvement inertiel, le seul changement est celui de la cadence du tic-tac de sa propre horloge. Par conséquent, l'action d'une particule libre sera proportionnelle au temps propre écoulé. Afin d'appliquer l'unité standard de l'énergie fois le temps, ou Js, à l'action, la première estimation de l'action pour une particule libre est

$$S = -mc^2 \int_{\tau_1}^{\tau_2} \mathrm{d}\tau \,, \tag{63}$$

où τ est le temps propre le long de sa trajectoire. C'est en vérité l'expression exacte. Elle implique la conservation de l'énergie et de l'impulsion (relativiste), puisque la variation du temps propre est maximale pour un mouvement en ligne droite avec une vitesse
Défi 105 pe constante. Pouvez-vous le confirmer ? En fait, dans la nature, toutes les particules se déplacent de telle manière que leur temps propre soit maximal. En d'autres termes, nous trouvons une nouvelle fois que dans la nature les choses changent le moins possible. La nature s'apparente à une vieille dame circonspecte : ses mouvements sont aussi lents que permis. Si vous préférez, tout changement recherche l'efficacité maximale. Comme nous l'avons déjà mentionné, Bertrand Russel appelait cela la *loi de la paresse universelle*.

L'expression (63) pour la définition de l'action est due à Max Planck. En 1906, en l'explorant plus en détail, il nota que le quantum d'action $\hbar$, qu'il avait découvert avec la constante de Boltzmann, est un invariant relativiste (comme la constante de Boltzmann
Défi 106 pe k). Pouvez-vous imaginer comment il s'y est pris ?

L'action peut également être décrite de manière plus compliquée, et apparemment plus effrayante. Ces modalités équivalentes pour l'écrire sont particulièrement appropriées pour préparer le terrain de la relativité générale :

$$S = \int L \,\mathrm{d}t = -mc^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\gamma} \,\mathrm{d}t = -mc \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sqrt{u_a u^a} \,\mathrm{d}\tau = -mc \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{\eta^{ab} \frac{\mathrm{d}x_a}{\mathrm{d}s} \frac{\mathrm{d}x_b}{\mathrm{d}s}} \,\mathrm{d}s \,, \tag{64}$$

où s représente une certaine fonction de τ, arbitraire, mais invariablement croissante, tel

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

que τ lui-même. Comme d'habitude, la *métrique* $\eta^{\alpha\beta}$ de la relativité restreinte est

$$\eta^{ab} = \eta_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \tag{65}$$

Vous pouvez aisément confirmer cette forme (64) de l'action en déduisant l'équation du
Défi 107 pe mouvement de la manière habituelle.

En résumé, la nature n'est pas pressée : chaque objet se déplace de telle manière que sa propre horloge indique la durée la *plus longue* possible par rapport à n'importe quel autre mouvement proche et peu différent*. Ce principe général est également valable pour des particules sous l'influence de la gravitation, comme nous le verrons dans la section sur la relativité générale, et pour des particules sous l'influence d'interactions électriques ou magnétiques. En fait, elle est valable dans toutes les situations de mouvement (macroscopique) rencontrées dans la nature. Pour l'instant, nous remarquons simplement que le temps propre le plus long est atteint lorsque la différence entre l'énergie cinétique et
Défi 109 pe l'énergie potentielle est minimale. (Pouvez-vous le confirmer ?) Pour l'approximation galiléenne, le temps propre maximal implique donc une différence moyenne minimale entre ces deux types d'énergie. Nous retrouvons ainsi le principe de moindre action dans sa formulation galiléenne.

Page 173 Auparavant, nous avions vu que l'action quantifie le changement qui se produit dans un système. La relativité restreinte montre que la nature minimise le changement en maximisant le temps propre. Dans la nature, *le temps propre est toujours maximal*. En d'autres termes, les choses se déplacent le long de trajectoires de *vieillissement maximum*. Pouvez-vous expliquer pourquoi le « vieillissement maximum » et la « paresse univer-
Défi 110 pe selle » sont équivalents ?

Nous découvrons ainsi une nouvelle fois que la nature est à l'opposé d'une superproduction d'Hollywood : la nature se modifie de la manière la plus parcimonieuse possible. La signification plus profonde de ce résultat est livrée à votre réflexion personnelle : amusez-vous avec !

Transformations conformes – pourquoi la vitesse de la lumière est-elle constante ?

La distinction entre l'espace et le temps en relativité restreinte dépend de l'observateur. D'un autre côté, tous les observateurs inertiels s'accordent sur la position, la forme et l'orientation du cône de lumière en un point donné. Donc, dans la théorie de la relativité, les cônes de lumière représentent les « objets » physiques fondamentaux. Étant donné leur importance, nous devrions nous demander si les observateurs inertiels sont uniquement ceux qui observent des cônes de lumière identiques. De manière intéressante, il apparaît que *d'autres* observateurs sont également concernés.

La première catégorie de ce type d'observateurs représente ceux qui utilisent des unités de mesure pour lesquelles toutes les longueurs et les durées sont multipliées par un

* Si les neutrinos étaient sans masse, l'action (64) ne serait pas applicable pour eux. Pourquoi ? Pouvez-vous
Défi 108 pe trouver une alternative pour ce cas (indubitablement purement académique) ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

facteur d'échelle λ. Les transformations qui représentent ces points de vue sont données par

$$x_a \mapsto \lambda x_a \tag{66}$$

et sont appelées des *dilatations*.

Une seconde catégorie d'observateurs additionnels est relevée en appliquant les *transformations conformes spéciales*. Celles-ci sont composées d'une *inversion*

$$x_a \mapsto \frac{x_a}{x^2} \tag{67}$$

et d'une *translation* par un vecteur b_a, à savoir

$$x_a \mapsto x_a + b_a \,, \tag{68}$$

puis d'une deuxième inversion. Ainsi les transformations conformes spéciales sont

$$x_a \mapsto \frac{x_a + b_a x^2}{1 + 2b_a x^a + b^2 x^2} \quad \text{ou} \quad \frac{x_a}{x^2} \mapsto \frac{x_a}{x^2} + b_a \,. \tag{69}$$

Ces transformations sont qualifiées de *conformes* parce qu'elles ne changent pas les
Défi 111 pe angles pour des formes (infinitésimalement) petites, comme vous pouvez le vérifier. Elles laissent par conséquent la *morphologie* (d'objets infinitésimalement petits) intacte. Par exemple, elles transforment des cercles infinitésimaux en cercles infinitésimaux. Elles sont qualifiées de *spéciales* parce que le groupe conforme *tout entier* contient les dilatations et aussi les transformations de Lorentz non homogènes*.

Remarquez que la manière dont les transformations conformes spéciales laissent les
Défi 113 pe cônes de lumière invariants est plutôt subtile.

Puisque les dilatations ne permutent pas avec les translations dans le temps, il n'existe aucune quantité conservée associée à cette symétrie. (La même chose est vraie pour les poussées de Lorentz.) Au contraire, les rotations et les translations dans l'espace permutent avec les translations dans le temps et donc conduisent à des quantités conservées.

En résumé, le vide est conformément invariant – au sens précis indiqué juste ci-dessus – et est donc également invariant par dilatation. C'est une autre manière d'exprimer le fait que le vide tout seul n'est pas suffisant pour définir des longueurs, puisqu'il ne fixe pas un facteur d'échelle. Comme nous devons nous y attendre, la matière est nécessaire pour cela. En fait, les transformations conformes (spéciales) ne sont pas des symétries représentatives de situations contenant de la matière. Seul l'espace vide est conformément invariant, la nature dans son intégralité ne l'est pas.

Défi 112 pe * L'ensemble de toutes les transformations conformes *spéciales* forme un groupe ayant quatre paramètres, en ajoutant les dilatations et les transformations de Lorentz non homogènes nous obtenons quinze paramètres pour le groupe conforme *complet*. Le groupe conforme est localement isomorphe à SU(2,2) et au groupe
Page ?? simple SO(4,2) : ces concepts sont expliqués dans l'Annexe ??. Remarquez que tout cela est vrai seulement pour *quatre* dimensions d'espace-temps ; en *deux* dimensions – l'autre cas important, particulièrement en théorie des cordes – le groupe conforme est isomorphe au groupe des transformations de coordonnées analytiques arbitraires, et est donc de dimension infinie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Toutefois, l'invariance conforme, ou l'invariance des cônes de lumière, est suffisante pour permettre des mesures de vitesse. Elle est également *nécessaire* pour les mesures de vitesse, comme vous devriez pouvoir le vérifier.

Défi 114 pe

Nous avons vu que l'invariance conforme implique la symétrie par renversement : c'est-à-dire que les grandes échelles et les petites échelles d'un espace vide sont reliées. Cela suggère que la constance de la vitesse de la lumière est associée à l'existence d'une symétrie par renversement. Cette correspondance mystérieuse nous permet d'entrevoir les aventures qui nous attendent dans la troisième partie de notre ascension de la Montagne Mouvement. L'invariance conforme s'avère être une propriété cruciale qui nous conduira vers des perspectives merveilleuses*.

OBSERVATEURS EN ACCÉLÉRATION

Jusque-là, nous n'avons étudié que ce que des observateurs inertiels, ou en mouvement libre, se disent l'un à l'autre lorsqu'ils parlent de la même observation. Par exemple, nous avons vu que des horloges en mouvement avancent toujours lentement. Cette histoire devient encore plus intéressante lorsque l'observateur ou les deux sont accélérés.

Nous entendons parfois dire que la relativité restreinte ne peut pas être utilisée pour décrire des observateurs accélérés. C'est faux, comme il est faux d'affirmer que la physique galiléenne ne peut pas être utilisée pour des observateurs accélérés. L'unique restriction de la relativité restreinte concerne le fait qu'elle ne peut être utilisée dans un espace-temps non plat, c'est-à-dire courbé. Des corps accélérés existent dans des espaces-temps plats, et par conséquent ils peuvent être discutés dans le cadre de la relativité restreinte.

En guise d'introduction, regardons ce qu'un observateur grec accéléré dit concernant l'horloge d'un autre inertiel, romain, et vice versa. Supposez que l'observateur grec, indiqué sur la Figure 42, se déplace le long de la trajectoire $\mathbf{x}(t)$, tel que le note l'observateur romain inertiel. En général, le rapport entre les variations des horloges grecque/romaine est donné par $\Delta\tau/\Delta t = (\tau_2 - \tau_1)/(t_2 - t_1)$. Ici les coordonnées grecques sont construites à l'aide d'une procédure simple : prenez les deux ensembles d'événements définis par $t = t_1$ et $t = t_2$, et posez τ_1 et τ_2 comme étant les points où ces ensembles coupent l'axe

Réf. 65

* Le groupe conforme n'apparaît pas seulement dans la cinématique de la relativité restreinte : il est le groupe de symétrie de toutes les interactions physiques, comme l'électromagnétisme, à condition que toutes les particules impliquées possèdent une masse nulle, comme c'est le cas pour le photon. Un champ qui possède une masse ne peut pas être conformément invariant, par conséquent l'invariance conforme n'est pas une symétrie exacte de la nature tout entière. Pouvez-vous confirmer qu'un terme de masse $m\varphi^2$ dans un lagrangien n'est pas conformément invariant ?

Défi 115 pe

Cependant, puisque toutes les particules observées jusqu'à présent possèdent des masses qui sont de plusieurs ordres de grandeur plus petites que la masse de Planck, nous pouvons dire qu'elles ont pour la plupart une masse évanescente, la symétrie conforme pouvant alors être vue comme une symétrie *approximative* de la nature. Selon cette idée, toutes les particules massives devraient être perçues comme des petites corrections, ou perturbations, de champs sans masse, c'est-à-dire conformément invariants. Donc, pour la construction d'une théorie fondamentale, des lagrangiens conformément invariants sont souvent présumés fournir une bonne approximation de départ.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

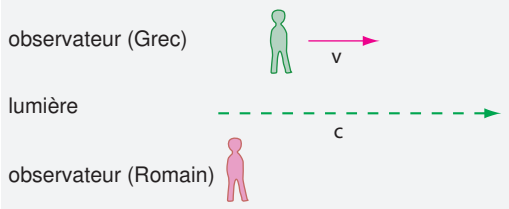


FIGURE 42 L'exemple le plus simple d'un observateur inertiel et d'un autre accéléré.

du temps de l'observateur grec*. Nous supposons que l'observateur grec est inertiel et se déplace avec une vitesse v tel qu'observé par le romain. Le rapport des horloges, pour un observateur grec est alors donné par

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}t} = \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{1}{\gamma_v} , \tag{70}$$

Défi 116 pe

une formule que nous avons l'habitude d'utiliser. Nous trouvons encore une fois que des horloges en mouvement avancent plus lentement.

Pour des mouvements accélérés, la version différentielle du raisonnement précédent est indispensable. Le rapport de la variation des horloges grecque/romaine est encore $\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t$, τ et $\tau + \mathrm{d}\tau$ sont calculés de la même manière que t et $t + \mathrm{d}t$. Supposons à nouveau que l'observateur grec se déplace le long de la trajectoire $\mathbf{x}(t)$, telle que mesurée par le romain. Il s'ensuit immédiatement que

Réf. 65

$$\tau = t - \mathbf{x}(t)\mathbf{v}(t)/c^2 \tag{71}$$

et donc

$$\tau + \mathrm{d}\tau = (t + \mathrm{d}t) - [\mathbf{x}(t) - \mathrm{d}t\mathbf{v}(t)][\mathbf{v}(t) + \mathrm{d}t\mathbf{a}(t)]/c^2 . \tag{72}$$

Ensemble, ces équations produisent

$$\text{« } \mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t \text{ » } = \gamma_v(1 - \mathbf{v}\mathbf{v}/c^2 - \mathbf{x}\mathbf{a}/c^2) . \tag{73}$$

Cela indique que des horloges accélérées peuvent avancer *rapidement* ou lentement, en fonction de leur position $\mathbf{x}$ et du signe de leur accélération $\mathbf{a}$. Les guillemets dans l'équation ci-dessus sont là parce que nous pouvons voir directement que l'observateur grec remarque que

$$\text{« } \mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau \text{ » } = \gamma_v , \tag{74}$$

ce qui n'est *pas* égal à l'inverse de l'équation (73). Cette divergence devient plus flagrante dans la situation simple de deux horloges ayant des vitesses égales, l'une d'entre elles possédant une accélération constante g en direction de l'origine, alors que l'autre se déplace de façon inertielle. Nous avons alors

$$\text{« } \mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t \text{ » } = 1 + gx/c^2 \tag{75}$$

* Ces ensembles forment ce que les mathématiciens nomment des *hypersurfaces*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

et

$$\text{« } \mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau \text{ » } = 1\,. \tag{76}$$

Nous allons bientôt discuter de ce contexte. Mais nous devons auparavant éclaircir la notion liée à l'accélération.

Accélération pour des observateurs inertiels

Les accélérations se comportent différemment des vitesses sous un changement de point de vue. Prenons tout d'abord le cas simple dans lequel l'objet et deux observateurs inertiels se déplacent tous le long de l'axe des x. Si l'observateur inertiel romain mesure une accélération $a = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t = \mathrm{d}^2x/\mathrm{d}t^2$, et si l'observateur grec, également inertiel, mesure
Réf. 17 une accélération $\alpha = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}^2\xi/\mathrm{d}\tau^2$, nous obtenons

$$\gamma_v^3 a = \gamma_\omega^3 \alpha\,. \tag{77}$$

Cette relation indique que les accélérations ne sont *pas* des invariants de Lorentz, à moins que les vitesses soient très petites comparées à la vitesse de la lumière. C'est en contradiction avec notre expérience quotidienne, où les accélérations sont indépendantes de la vitesse de l'observateur.

L'expression (77) se simplifie si les accélérations sont mesurées à un instant t pour lequel ω disparaît – c'est-à-dire si elles sont mesurées par l'observateur inertiel *comobile*. Dans ce cas la relation pour l'accélération est donnée par

$$a_c = a\gamma_v^3 \tag{78}$$

et l'accélération $a_c = \alpha$ est également appelée accélération propre, puisque sa valeur décrit ce que l'observateur comobile grec *ressent* : l'accélération propre décrit la sensation d'être poussé vers l'arrière du siège en accélération.

En général, la vitesse de l'observateur et l'accélération ne sont pas parallèles. Nous pouvons évaluer comment la valeur de la tri-accélération $\mathbf{a}$ mesurée par un observateur
Réf. 66 inertiel général est reliée à la valeur $\mathbf{a}_c$ mesurée par l'observateur comobile en utilisant les expressions (51) et (49). Nous obtenons la généralisation de (78) :

$$\mathbf{v}\mathbf{a}_c = \mathbf{v}\mathbf{a}\gamma_v^3 \tag{79}$$

et

$$\mathbf{a} = \frac{1}{\gamma_v^2}\left(\mathbf{a}_c - \frac{(1-\gamma_v)(\mathbf{v}\mathbf{a}_c)\mathbf{v}}{v^2} - \frac{\gamma_v(\mathbf{v}\mathbf{a}_c)\mathbf{v}}{c^2}\right)\,. \tag{80}$$

En mettant le tout au carré nous obtenons la relation

$$a^2 = \frac{1}{\gamma_v^4}\left(a_c^2 - \frac{(\mathbf{a}_c\mathbf{v})^2}{c^2}\right) \tag{81}$$

Page 69 que nous connaissons déjà sous une forme légèrement différente. Elle montre (à

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

nouveau) que la tri-accélération propre ou comobile est toujours supérieure à la tri-accélération mesurée par un observateur inertiel extérieur. Plus l'observateur inertiel
Défi 117 e extérieur se déplace vite, plus l'accélération qu'il observe est petite. L'accélération n'est pas un invariant relativiste. Cette expression montre également qu'à chaque fois que la vitesse est perpendiculaire à l'accélération une poussée produit un facteur γ_v^2, tandis qu'une vitesse parallèle à l'accélération donne la dépendance en γ_v^3 déjà mentionnée.

Nous voyons que l'accélération complique de nombreux problèmes et requiert une analyse plus poussée. Pour rester dans des sujets simples, nous allons désormais étudier uniquement des accélérations *constantes*. Il est intéressant de noter que cette situation
Page 241 constitue aussi une bonne introduction aux trous noirs et, comme nous le verrons bientôt, à l'univers dans son ensemble.

Référentiels accélérés

Comment pouvons-nous vérifier que nous sommes dans un référentiel inertiel ? Définissons tout d'abord ce terme. Un *référentiel inertiel* possède deux propriétés déterminantes. Premièrement, des longueurs et des distances mesurées avec une règle sont décrites par la géométrie euclidienne. En d'autres termes, les règles agissent de la même manière que dans la vie courante. En particulier, des distances relevées en comptant combien de règles (barres) doivent être positionnées bout à bout pour arpenter la distance d'un point à un autre – la *distance des barres* – se comportent comme dans la vie quotidienne. Par exemple, elles obéissent au théorème de Pythagore dans le cas de triangles rectangles. Deuxièmement, la vitesse de la lumière est constante. En d'autres termes, deux observateurs quelconques situés dans ce référentiel, où leurs temps et leurs positions sont indépendants, font l'observation suivante : le rapport c entre le double de la distance des barres entre deux points et le temps mis par la lumière pour voyager d'un de ces points à l'autre puis revenir au point de départ est toujours le même.

De façon équivalente, un référentiel inertiel est celui pour lequel toutes les horloges restent toujours synchronisées et où la géométrie est euclidienne. En particulier, dans un référentiel inertiel, tous les observateurs situés à des coordonnées fixes demeurent toujours au repos l'un par rapport à l'autre. Cette dernière condition est cependant plus générale : il existe d'autres situations, non inertielles, où cela reste le cas.

Les référentiels non inertiels, ou *référentiels accélérés*, constituent un concept utile en relativité restreinte. En fait, nous vivons tous dans un tel référentiel. Nous pouvons utiliser la relativité restreinte pour les décrire, de la même manière que nous avons utilisé la physique galiléenne pour les décrire au début de notre expédition.

Un *référentiel* en général est un ensemble continu d'observateurs demeurant au repos les uns par rapport aux autres. Ici, « au repos les uns par rapport aux autres » signifie que le temps nécessaire à un signal lumineux pour aller d'un observateur à un autre et revenir est constant au cours du temps, ou, de manière équivalente, que la distance des barres entre deux observateurs est constante. N'importe quel référentiel peut par conséquent également être appelé collection *rigide* d'observateurs. Nous remarquons donc qu'un référentiel en général n'est *pas* la même chose qu'un ensemble de coordonnées, ce dernier n'est généralement *pas* rigide. Si tous les observateurs reliés de manière rigide possèdent des valeurs constantes de coordonnées, nous parlons d'un *système de coordonnées rigide*. Bien sûr, ceux-ci sont utiles surtout lorsqu'il est nécessaire de décrire des référentiels

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

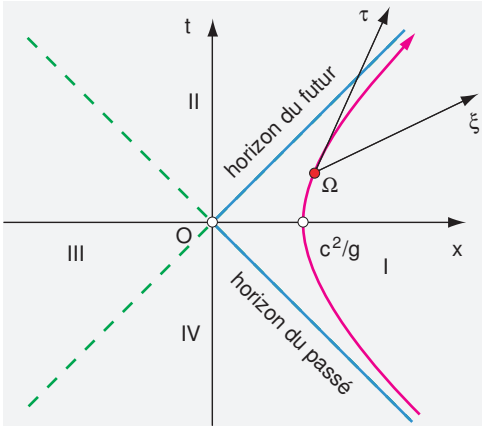


FIGURE 43 Mouvement hyperbolique d'un observateur Ω en accélération uniforme et rectiligne.

accélérés*.

Réf. 68 Remarquez que si deux observateurs se déplacent ensemble avec une vitesse **v**, telle que mesurée dans un certain référentiel *inertiel*, ils observent qu'ils sont au repos l'un Défi 118 pe par rapport à l'autre *seulement* si cette vitesse est *constante*. Encore une fois nous notons, comme ci-dessus, que deux individus attachés l'un à l'autre par une corde, et à une distance telle que la corde soit tendue, verront la corde se rompre (ou ne seront plus attachés) s'ils accélèrent ensemble vers (ou décélèrent depuis) des vitesses relativistes exactement de la même manière. L'accélération relativiste exige une attention rigoureuse.

Un observateur qui *ressent* constamment la *même* force appliquée sur son corps est qualifié d'*uniformément* accéléré. Plus précisément, un observateur en accélération uniforme est un observateur dont l'accélération à chaque instant, mesurée dans le référentiel inertiel par rapport auquel l'observateur est au repos *à cet instant*, possède toujours la valeur identique **B**. Il est important de remarquer que l'accélération uniforme n'est *pas* uniformément accélérée quand elle est toujours observée depuis le *même* référentiel inertiel. C'est une différence importante par rapport au cas galiléen.

Pour un mouvement uniformément accéléré au sens où nous venons de le définir, nous exigeons que

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{B} = -g^2 \tag{82}$$

Réf. 69 où g représente une constante indépendante de t. Le cas le plus simple est un mouvement uniformément accéléré qui est également *rectiligne*, c'est-à-dire pour lequel l'accélération **a** est parallèle à **v** à un instant donné du temps et (par conséquent) pour tous les autres instants également. Dans ce cas nous pouvons écrire, en utilisant des vecteurs à

* Il n'existe fondamentalement que deux autres types de référentiels de coordonnées rigides, excepté les Réf. 67 référentiels inertiels :

— Le référentiel $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 (1 + g_k x_k / c^2)^2$ avec une accélération arbitraire, mais constante, de l'origine. L'accélération est $\mathbf{a} = -\mathbf{g}(1 + \mathbf{g}x/c^2)$.
— Le référentiel en rotation uniforme $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + 2\omega(-y\,dx + x\,dy)dt - (1 - r^2\omega^2/c^2)dt$. Ici l'axe z représente l'axe de rotation, et $r^2 = x^2 + y^2$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 119 pe

trois composantes,

$$\gamma^3 \mathbf{a} = \mathbf{g} \quad \text{ou} \quad \frac{\mathrm{d}\gamma\mathbf{v}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{g}\,. \tag{83}$$

En supposant que la direction considérée coïncide avec l'axe des x, puis en résolvant pour $v(t)$, nous obtenons

$$v = \frac{gt}{\sqrt{1 + \frac{g^2 t^2}{c^2}}}\,, \tag{84}$$

où il a été supposé que $v(0) = 0$. Nous remarquons que pour des durées très petites nous avons $v = gt$, et que pour des longues durées $v = c$, comme attendu. La quantité de mouvement de l'observateur accéléré augmente linéairement avec le temps, encore

Défi 120 pe

une fois comme prévu. En intégrant, nous découvrons que l'observateur accéléré suit la trajectoire

$$x(t) = \frac{c^2}{g}\sqrt{1 + \frac{g^2 t^2}{c^2}}\,, \tag{85}$$

où nous avons fait l'hypothèse que $x(0) = c^2/g$, afin d'obtenir une expression plus simple. À cause de ce résultat, visualisé dans la Figure 43, on dit qu'un observateur en accélération uniforme et rectiligne décrit un mouvement *hyperbolique*. Pour des durées très petites, la ligne d'univers se réduit à l'expression habituelle $x = gt^2/2 + x_0$, tandis que pour des grandes durées elle vaut $x = ct$, comme prévu. Ce mouvement est donc uniformément accéléré uniquement pour le corps mobile lui-même, et *non pas* pour un observateur extérieur.

Le temps propre τ de l'observateur accéléré est relié au temps t du référentiel inertiel de la manière classique par $\mathrm{d}t = \gamma \mathrm{d}\tau$. En utilisant l'expression pour la vitesse $v(t)$ de

Réf. 69, Réf. 70

l'équation (84) nous obtenons*

$$t = \frac{c}{g}\sinh\frac{g\tau}{c} \quad \text{et} \quad x = \frac{c^2}{g}\cosh\frac{g\tau}{c} \tag{86}$$

pour la relation entre le temps propre τ, mesuré par l'observateur romain inertiel et externe, et le temps t et la position x. Nous rencontrerons cette relation à nouveau pendant notre étude des trous noirs.

Tout cela vous semble inintéressant ? Imaginez simplement que vous accéléreriez à vive allure sur une moto à $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ pendant un temps propre τ de 25 ans. Cette moto vous emporterait au-delà des confins de l'univers connu ! Cela ne vaut-il pas la peine d'essayer ? Malheureusement, il n'existe ni moto ni missile qui pourraient accélérer à ce point, parce que leur réservoir à carburant devrait être énorme. Pouvez-vous le confir-

Défi 121 s

mer ?

* Utilisez votre formulaire préféré de mathématiques – chaque étudiant devrait en avoir un – pour déduire

Réf. 71

cela. Le *sinus hyperbolique* et le *cosinus hyperbolique* sont définis par $\sinh y = (\mathrm{e}^y - \mathrm{e}^{-y})/2$ et $\cosh y = (\mathrm{e}^y + \mathrm{e}^{-y})/2$. Ils impliquent que $\int \mathrm{d}y/\sqrt{y^2 + a^2} = \operatorname{arsinh} y/a = \operatorname{Arsh} y/a = \ln(y + \sqrt{y^2 + a^2})$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Pour l'accélération uniforme, les coordonnées se transforment comme suit

$$\begin{aligned} t &= (\frac{c}{g} + \frac{\xi}{c}) \sinh \frac{g\tau}{c} \\ x &= (\frac{c^2}{g} + \xi) \cosh \frac{g\tau}{c} \\ y &= v \\ z &= \zeta \,, \end{aligned} \tag{87}$$

où τ représente maintenant la coordonnée de temps dans le référentiel grec. Nous remarquons également que l'intervalle d'espace-temps $\mathrm{d}\sigma$ vérifie

$$\mathrm{d}\sigma^2 = (1 + g\xi/c^2)^2 c^2 \mathrm{d}\tau^2 - \mathrm{d}\xi^2 - \mathrm{d}v^2 - \mathrm{d}\zeta^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - \mathrm{d}x^2 - \mathrm{d}y^2 - \mathrm{d}z^2 \,, \tag{88}$$

et puisque pour $\mathrm{d}\tau = 0$ les distances sont données par le théorème de Pythagore, le référentiel grec est en réalité rigide.

Réf. 72

Après cette foison de formules, occupons-nous d'une question simple, indiquée sur la Figure 43. L'observateur inertiel romain O voit l'observateur grec Ω se déplacer avec une accélération g, s'éloignant de plus en plus et obéissant à l'équation (85). Qu'est-ce que l'observateur grec dit à propos de son collègue romain ? Avec tout ce que nous savons maintenant, il est facile de répondre. À chaque point de sa trajectoire, Ω voit que O possède la coordonnée $\tau = 0$ (pouvez-vous confirmer ce point ?), ce qui signifie que la distance à l'observateur romain, telle qu'elle est perçue par le Grec, est la même que l'intervalle d'espace-temps OΩ. En utilisant l'expression (85), nous voyons qu'elle est

Défi 122 e

Réf. 73

$$d_{\mathrm{O}\Omega} = \sqrt{\xi^2} = \sqrt{x^2 - c^2t^2} = c^2/g \,, \tag{89}$$

ce qui est, de manière assez surprenante, constant au cours du temps ! En d'autres termes, l'observateur grec notera qu'il demeure à une distance constante du romain, en parfaite contradiction avec ce que l'observateur romain affirme. Prenez votre temps pour vérifier cette conséquence bouleversante d'une tout autre manière. Nous aurons encore besoin de cela plus tard, pour expliquer pourquoi la Terre n'explose pas. (Pouvez-vous deviner comment cette question est reliée à ce résultat ?)

Défi 123 s

Le théorème de la composition des accélérations est plus complexe que le théorème de la composition des vitesses. Sa meilleure explication fut publiée par Mishra. Si nous appelons a_{nm} l'accélération du système n par l'observateur m, nous cherchons à exprimer l'accélération de l'objet a_{01} comme une fonction de la valeur a_{02} mesurée par l'autre observateur, de l'accélération relative a_{12} et de l'accélération propre a_{22} de l'autre observateur : regardez la Figure 44. Ici nous étudierons uniquement des situations unidimensionnelles, où tous les observateurs et tous les objets se déplacent le long d'un seul axe. (Pour plus de clarté, nous notons également $v_{11} = v$ et $v_{02} = u$.) En physique galiléenne nous avons la relation générale

Réf. 74

Défi 124 e

$$a_{01} = a_{02} - a_{12} + a_{22} \tag{90}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

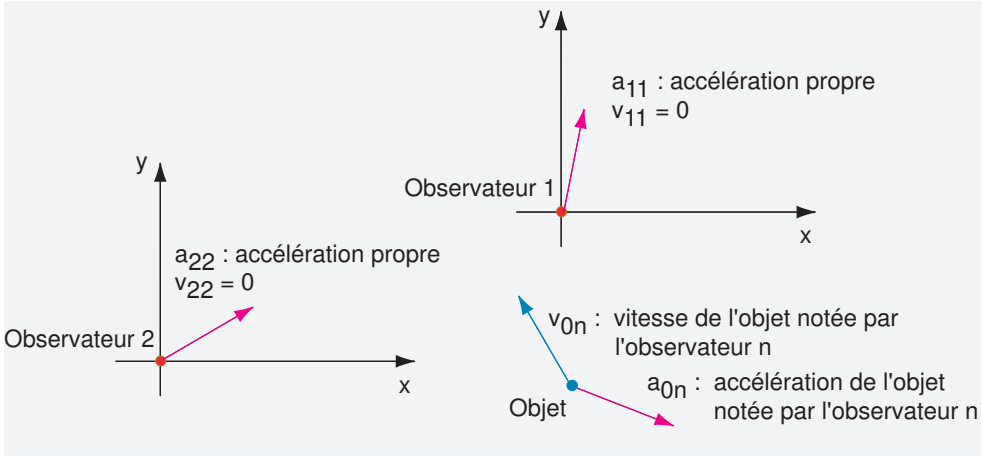


FIGURE 44 Les définitions nécessaires pour déduire le comportement de la composition des accélérations.

parce que les accélérations se comportent de manière simple. En relativité restreinte, nous obtenons

$$a_{01} = a_{02}\frac{(1-v^2/c^2)^{3/2}}{(1-uv/c^2)^3} - a_{12}\frac{(1-u^2/c^2)(1-v^2/c^2)^{-1/2}}{(1-uv/c^2)^2} + a_{22}\frac{(1-u^2/c^2)(1-v^2/c^2)^{3/2}}{(1-uv/c^2)^3} \tag{91}$$

Défi 125 pe et vous devriez vous amuser à vérifier cette expression.

Page 57 Pouvez-vous maintenant stipuler comment le rapport des accélérations s'inscrit dans

Défi 126 pe la définition de la masse en relativité restreinte ?

HORIZONS DES ÉVÉNEMENTS

Le mouvement accéléré exhibe de nombreuses propriétés surprenantes. Il en est une d'un intérêt particulier qui concerne la trajectoire, en termes de coordonnées ξ et τ dans le référentiel rigide accéléré, d'un objet situé au point de départ $x = x_0 = c^2/g$, à chaque

Défi 127 pe instant t. Nous avons les deux relations*

$$\xi = -\frac{c^2}{g}(1 - \operatorname{sech}\frac{g\tau}{c})$$
$$\mathrm{d}\xi/\mathrm{d}\tau = -c \operatorname{sech}\frac{g\tau}{c}\tanh\frac{g\tau}{c} . \tag{93}$$

Ces équations sont étranges. Pour des temps τ très grands, la coordonnée ξ s'approche de la valeur limite $-c^2/g$ et $\mathrm{d}\xi/\mathrm{d}\tau$ devient nulle. Cette situation est identique à celle d'un vé-

* Les fonctions apparaissant ci-dessus, la *sécante hyperbolique* et la *tangente hyperbolique*, sont définies en utilisant les expressions provenant de la note de la page 82 :

$$\operatorname{sech}\ y = \frac{1}{\cosh\ y} \quad \text{et} \quad \tanh\ y = \frac{\sinh\ y}{\cosh\ y} . \tag{92}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

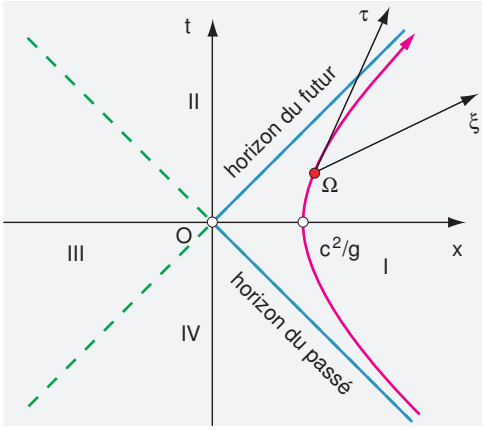


FIGURE 45 Mouvement hyperbolique et horizons des événements.

hicule qui accélère en s'éloignant d'une femme debout au bord d'une longue route. Vue depuis la voiture, la femme s'éloigne ; pourtant, après un certain temps, la seule chose que le conducteur remarque est qu'elle s'approche lentement de l'horizon. En physique galiléenne, à la fois le conducteur du véhicule et la femme sur la route observent que l'autre personne s'approche de leur horizon. En relativité restreinte, seul l'observateur accéléré fait cette observation.

Un graphique de la situation permet d'éclaircir ce résultat. Dans la Figure 45 nous pouvons voir que la lumière émise depuis n'importe quel événement des régions II et III ne peut atteindre l'observateur grec. Ces événements-là sont masqués pour lui et ne peuvent pas être observés. Assez étrangement, pourtant, la lumière émise par l'observateur grec *peut* atteindre la région II. La frontière entre la partie de l'espace-temps qui peut être observée et la partie que ne peut l'être est appelée l'*horizon des événements*. En relativité, les horizons des événements agissent comme des passerelles à sens unique pour la lumière et d'autres signaux. Afin d'être exhaustif, le graphique indique également l'horizon des événements passés. Pouvez-vous confirmer que les horizons des événements sont *noirs* ?

Défi 128 pe

Donc, tous les événements observés dans un référentiel inertiel ne peuvent pas être observés dans un référentiel en accélération uniforme. Les référentiels uniformément accélérés produisent des horizons des événements situés à une distance de $-c^2/g$. Par exemple, une personne qui est debout ne peut jamais voir plus loin que cette distance, mesurée depuis ses pieds.

Par ailleurs, est-il vrai qu'un rayon lumineux ne peut pas être intercepté par un observateur en mouvement hyperbolique, si l'observateur possède une longueur d'avance suffisante ?

Défi 129 s

Maintenant nous formulons un défi encore plus fort, qui nous préparera à la relativité générale. Quelle est la *forme* de l'horizon, vue par un observateur uniformément accéléré ?

Défi 130 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'ACCÉLÉRATION MODIFIE LA COULEUR

Nous avons vu auparavant qu'un récepteur mobile perçoit des couleurs différentes par rapport à l'émetteur. Jusqu'à présent, nous avons discuté du décalage de couleur, ou effet Doppler, uniquement pour des observateurs inertiels. Pour des référentiels accélérés la situation est encore plus bizarre : l'émetteur et le récepteur ne s'accordent pas sur les couleurs, même s'ils sont *au repos* l'un par rapport à l'autre. En réalité, si la lumière est émise dans la direction de l'accélération, la formule des intervalles d'espace-temps donne

Réf. 69, Réf. 75

$$\mathrm{d}\sigma^2 = \left(1 + \frac{g_0 x}{c^2}\right)^2 c^2 \mathrm{d}t^2 \tag{94}$$

dans laquelle g_0 est l'accélération propre d'un observateur situé au point $x = 0$. Nous pouvons déduire d'une manière directe que

Défi 131 pe

$$\frac{f_\mathrm{r}}{f_\mathrm{s}} = 1 - \frac{g_\mathrm{r} h}{c^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{g_\mathrm{s} h}{c^2}\right)} \tag{95}$$

où h représente la distance des barres entre la source et le récepteur, et où $g_\mathrm{s} = g_0/(1 + g_0 x_\mathrm{s}/c^2)$ et $g_\mathrm{r} = g_0/(1 + g_0 x_\mathrm{r}/c^2)$ sont les accélérations propres mesurées à la source et au détecteur. En bref, la fréquence de la lumière décroît lorsque la lumière se déplace dans la direction de l'accélération. D'ailleurs, cela a-t-il un effet sur la couleur des arbres dans leur direction verticale ?

Défi 132 s

La formule généralement citée, à savoir

$$\frac{f_\mathrm{r}}{f_\mathrm{s}} = 1 - \frac{gh}{c^2}\,, \tag{96}$$

n'est exacte qu'en première approximation. Dans des référentiels accélérés, nous devons être prudents à propos de la signification de chaque quantité. Pour les accélérations courantes, toutefois, les différences entre les deux formules sont négligeables. Pouvez-vous confirmer ce point ?

Défi 133 pe

LA LUMIÈRE PEUT-ELLE ALLER PLUS VITE QUE c ?

Quelle est la vitesse de la lumière mesurée par un observateur accéléré ? En utilisant l'expression (96) précédente, un observateur en accélération en tire que

$$v_\mathrm{lumière} = c\left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \tag{97}$$

ce qui est supérieur à c pour de la lumière se déplaçant en face ou « au-dessus » de lui, et inférieur à c pour de la lumière se déplaçant derrière ou « en dessous » de lui. Cette conséquence déconcertante découle d'une propriété élémentaire d'un référentiel accéléré quelconque. Dans un tel référentiel, bien que tous les observateurs soient au repos les uns par rapport aux autres, les horloges ne restent *pas* synchronisées. Cette variation

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

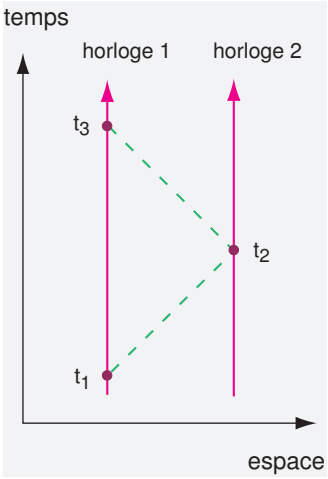


FIGURE 46 Horloges et mesure de la vitesse de la lumière par une approche à double sens.

de la vitesse de la lumière a également été confirmée par l'expérience*. Ainsi, la vitesse de la lumière n'est constante que lorsqu'elle est définie par $c = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$, *et* si $\mathrm{d}x$ et $\mathrm{d}t$ sont mesurés avec une règle située *à l'intérieur* de l'intervalle $\mathrm{d}x$ et une horloge lue *pendant* l'intervalle $\mathrm{d}t$. Si la vitesse de la lumière est définie par $\Delta x/\Delta t$, ou si la règle définissant les distances, ou l'horloge mesurant le temps, est située à une grande distance de la lumière qui se propage, la vitesse de la lumière est différente de c pour des observateurs en accélération ! C'est le même effet que vous pouvez expérimenter lorsque vous tournez sur vous-même, autour de votre axe vertical, la nuit : les vitesses des étoiles que vous observez sont beaucoup plus élevées que la vitesse de la lumière.

Remarquez que ce résultat n'implique pas que des signaux ou de l'énergie puissent se
Défi 134 s déplacer plus vite que c. Vous devez pouvoir le vérifier par vous-même.

En fait, tous ces effets sont négligeables pour des distances l qui sont insignifiantes par rapport à c^2/a. Pour une accélération de 9,5 m/s^2 (environ celle de la chute libre), les distances devraient être de l'ordre d'une année-lumière, ou $9{,}5 \cdot 10^{12}$ km, afin de rendre observable n'importe quel effet significatif. En bref, *c est la vitesse de la lumière seulement relativement à la matière située* à proximité.

D'ailleurs, la gravité quotidienne est équivalente à une accélération constante. Donc pourquoi, d'après l'expression (97), des objets éloignés tels que des étoiles ne se
Défi 135 s déplacent-ils pas plus vite que la lumière ?

Qu'est-ce que la vitesse de la lumière ?

Nous avons vu que la vitesse de la lumière, telle qu'elle est généralement définie, est donnée par c seulement si l'observateur est inertiel ou s'il mesure la vitesse de la lumière passant à proximité (au lieu de la lumière qui passe au loin). En résumé, la vitesse de la lumière doit être mesurée localement. Mais cette condition n'élimine pas toutes les subtilités.

Page 164 * Les propagations retardées qui seront discutées au chapitre sur la relativité générale peuvent être vues comme des confirmations de cet effet.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Un point supplémentaire est souvent omis. Généralement, la longueur est mesurée par le temps que la lumière met pour voyager. Dans un tel cas la vitesse de la lumière sera bien évidemment constante. Mais comment vérifions-nous cette constance ? Nous avons besoin de faire abstraction des mesures de longueur. La manière la plus simple pour y parvenir est de faire réfléchir la lumière avec un miroir, comme indiqué sur la Figure 46. La constance de la vitesse de la lumière implique que, si la lumière va et vient le long d'une courte ligne droite, alors les horloges situées aux deux extrémités mesurent le temps donné par

$$t_3 - t_1 = 2\,(t_2 - t_1)\,. \tag{98}$$

Nous supposons ici que les horloges ont été synchronisées en accord avec les instructions de la page 44. Si le facteur n'était pas exactement égal à deux, la vitesse de la lumière ne serait pas constante. En réalité, toutes les expériences réalisées jusqu'à présent ont produit un facteur égal à deux, dans les limites des erreurs de mesure*.

Ce résultat est parfois exprimé en disant qu'il est impossible de mesurer la *vitesse de la lumière à sens unique*, seule la vitesse de la lumière à *double sens* (aller et retour) est mesurable. Êtes-vous d'accord ?

Défi 136 s

Limites sur la longueur des corps solides

Un objet solide familier se brise lorsqu'une certaine partie de celui-ci se déplace par rapport à une autre partie donnée à une vitesse supérieure à la vitesse du son c pour ce matériau**. Par exemple, quand un objet frappe le sol et que sa partie frontale est stoppée dans l'intervalle d'une distance d, l'objet finit par se briser lorsque

$$\frac{v^2}{c^2} \geqslant \frac{2d}{l}\,. \tag{99}$$

De cette manière, nous voyons que nous pouvons éviter de briser des objets fragiles en les enveloppant dans de la mousse – ce qui augmente la distance d'arrêt – ayant une épaisseur approximativement égale à la taille de l'objet. Cela pourrait expliquer pourquoi des boîtes contenant des cadeaux sont généralement beaucoup plus grandes que les cadeaux eux-mêmes !

La limite de rupture peut aussi être écrite d'une manière différente. Pour éviter la brisure, l'accélération a d'un corps solide de longueur l doit vérifier

$$la < c^2\,, \tag{100}$$

où c représente la vitesse du son, qui est la vitesse limite pour les parties matérielles

* Les subtilités concernant l'approche à sens unique et à double sens de la vitesse de la lumière demeureront un sujet de discussion pendant longtemps. Un grand nombre d'expériences sont expliquées et discutées dans la Réf. 22. Zhang affirme, dans son récapitulatif en page 171, que la vitesse de la lumière à sens unique est en réalité indépendante de la source lumineuse. Toutefois, aucune expérience ne montre réellement qu'elle est équivalente à l'approche à double sens. Qui plus est, la plupart des expériences dites à « sens unique » sont toujours en fait des expériences à « double sens » (consultez sa page 150).

Réf. 76

** La vitesse (longitudinale) du son est d'environ 5,9 km/s pour le verre, le fer ou l'acier, environ 4,5 km/s pour l'or et environ 2 km/s pour le plomb. La page 209 liste d'autres vitesses pour le son.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

des solides. Reprenons maintenant la discussion en relativité, en utilisant la vitesse de la
Réf. 77 lumière au lieu de celle du son. Imaginez que vous accélériez la face frontale d'un corps *solide* avec une certaine accélération *propre* a. La face arrière ne peut pas se déplacer avec une accélération α supérieure ou égale à l'infini, ou, si nous préférons, elle ne peut
Défi 137 s pas se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière. Une rapide vérification montre par conséquent que la longueur l d'un corps solide doit vérifier

$$l\alpha < c^2/2\,, \tag{101}$$

où c est maintenant la vitesse de la lumière. Celle-ci limite donc la taille des corps solides. Par exemple, à 9,8 $\mathrm{m/s^2}$, l'accélération d'une moto puissante, cette expression donne une longueur limite de 9,2 Pm, soit environ une année-lumière. Ce n'est pas une restriction importante : toutes les motos sont plus courtes.

En revanche, il existe d'autres situations plus intéressantes. Les accélérations les plus élevées atteintes aujourd'hui sont produites dans les accélérateurs de particules. Les noyaux atomiques possèdent une taille de quelques femtomètres. Pouvez-vous déduire
Défi 138 pe à quelles énergies ils se brisent lorsqu'ils se heurtent violemment dans un accélérateur ? En fait, à l'intérieur d'un noyau, les nucléons se déplacent à des accélérations de l'ordre de $v^2/r \approx \hbar^2/m^2r^3 \approx 10^{31}\,\mathrm{m/s^2}$: c'est une des valeurs les plus élevées rencontrées dans la nature.

Remarquez que la physique galiléenne et la relativité induisent une conclusion identique : une vitesse limite, fût-elle celle du son ou celle de la lumière, fait qu'il est impossible que les corps solides soient *rigides*. Lorsque nous poussons une extrémité d'un corps, l'autre extrémité se déplace toujours un petit peu plus tard.

Une énigme : la vitesse limite entraîne-t-elle l'existence d'une « relation d'incertitude » relativiste

$$\Delta l\ \Delta a \geqslant c^2 \tag{102}$$

Page ?? pour l'indétermination entre la longueur et l'accélération ?

Qu'est-ce que tout cela implique pour la taille des particules élémentaires ? Prenez deux électrons séparés par une distance d, et notez l leur taille. L'accélération due à la répulsion électrostatique conduit alors à une limite supérieure pour leur taille donnée
Défi 139 pe par

$$l < \frac{4\pi\varepsilon_0 c^2 d^2 m}{e^2}\,. \tag{103}$$

Plus les électrons peuvent être proches, plus ils doivent être petits. La limite expérimentale actuelle donne une taille inférieure à 10^{-19} m. Les électrons peuvent-ils être réellement ponctuels ? Nous reviendrons sur cette question durant notre étude de la relativité générale et de la théorie quantique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

LA RELATIVITÉ RESTREINTE EN QUATRE PROPOSITIONS

Cette étape de notre ascension de la Montagne Mouvement peut être rapidement synthétisée.

— Tout observateur (flottant librement) remarque qu'il existe une vitesse unique et parfaite dans la nature, à savoir une vitesse maximale pour l'énergie ordinaire, qui se rapporte au rayonnement sans masse comme la lumière ou les signaux radio, mais qui ne peut être atteinte par les systèmes matériels.
— Par conséquent, bien que l'espace-temps soit le même pour tous les observateurs, les durées et les longueurs varient d'un observateur à l'autre, comme les transformations de Lorentz (13) et (14) l'expliquent, et comme les expériences le confirment.
— Les collisions indiquent qu'une vitesse maximale implique que la masse est de l'énergie concentrée, et que l'énergie totale d'un corps est donnée par $E = \gamma mc^2$, comme les expériences le confirment encore une fois.
— Appliqués à des objets accélérés, ces résultats conduisent à un grand nombre de conséquences qui défient l'intuition, tels le paradoxe des jumeaux, l'émergence des horizons des événements et l'apparition de tachyons à courte durée de vie dans les collisions.

La relativité restreinte montre que le mouvement, bien qu'il soit limité en vitesse, est relatif, défini à l'aide de la propagation de la lumière, conservé, réversible et déterministe.

La vitesse de la lumière a-t-elle pu fluctuer ?

La vitesse de la lumière dépourvue de masse est la vitesse limite. En supposant que toute la lumière soit en réalité sans masse, la vitesse de la lumière a-t-elle pu malgré tout varier d'un endroit à l'autre, ou au fil du temps ? Ce problème retors nous donne toujours la sensation d'être idiot à côté de nombreux physiciens. La première réponse est généralement formulée sous la forme d'un net : « Oui, bien sûr ! Regardez simplement ce qui se passe lorsque la valeur de c est modifiée dans la formule ». (En réalité, il y a même eu des tentatives pour bâtir des « théories de la vitesse de la lumière variable ».) Cependant, cette affirmation souvent formulée est fausse.

Puisque la vitesse de la lumière s'inscrit dans notre définition de l'espace et du temps, elle s'immisce alors, même si nous ne le remarquons pas, dans la construction de toutes les règles, tous les étalons de mesure et tous les instruments de mesure. Donc il n'y a aucune manière de détecter si cette valeur fluctue réellement. Aucune expérience concevable ne pourrait détecter une variation de la vitesse limite, puisque celle-ci représente le fondement de toutes les mesures. « C'est une cruauté intellectuelle ! », pourriez-vous penser. « Toutes les expériences montrent que la vitesse de la lumière est invariante, nous devons admettre les conséquences non intuitives les unes après les autres pour accepter la constance de la vitesse de la lumière, et nous serions dorénavant censés admettre qu'il n'y a aucun autre choix ? » Oui, nous le sommes. C'est le comble des progrès de la physique. L'invariance de la vitesse de la lumière par rapport à l'observateur est contre-intuitive et choquante lorsqu'elle est comparée à l'absence d'invariance par rapport à l'observateur aux vitesses quotidiennes, galiléennes. Mais si nous avions pris en considération le fait que chaque mesure de vitesse est fondée – que nous le voulions ou non –

Défi 140 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sur une comparaison avec la vitesse de la lumière, nous n'aurions pas été étonnés par la constance de celle-ci ; au contraire, nous aurions été étonnés par les propriétés étranges des *petites* vitesses.

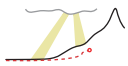
En résumé, il n'existe en principe aucune façon de vérifier l'invariance d'un étalon de mesure. Autrement dit, l'aspect vraiment surprenant de la relativité n'est pas l'invariance de c, c'est sa disparition des formules propres au mouvement quotidien.

Que se passe-t-il près de la vitesse de la lumière ?

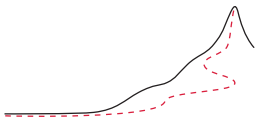
Au fur et à mesure que nous approchons de la vitesse de la lumière, les quantités présentes dans la transformation de Lorentz divergent. Une division par zéro est impossible : en réalité, ni les masses ni les observateurs ne peuvent se déplacer à la vitesse de la lumière. Toutefois, cette conclusion est incomplète.

Aucune observable ne diverge réellement dans la nature. En s'approchant aussi près que possible de la vitesse de la lumière, la relativité restreinte elle-même s'effondre. Aux contractions de Lorentz extrêmement grandes, il n'existe aucune manière de faire fi de la courbure de l'espace-temps. En fait, la gravitation doit être prise en compte dans ces situations. À proximité des horizons, nous ne pouvons pas ignorer les fluctuations de vitesse et de position : ici la théorie quantique doit être prise en considération. L'exploration de ces deux limitations définit les deux prochaines étapes de notre ascension de la Montagne Mouvement.

Au début de notre aventure, pendant notre exploration de la physique galiléenne, après avoir défini les concepts fondamentaux de la vitesse, de l'espace et du temps, nous avons tourné notre regard vers la gravitation. L'invariance de la vitesse de la lumière nous a obligé à revoir ces concepts de base. Nous allons maintenant revenir à l'étude de la gravitation à la lumière de cette invariance.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 2

RELATIVITÉ GÉNÉRALE : GRAVITATION, VITESSE MAXIMALE ET FORCE MAXIMALE

Générale, cette nouvelle théorie (relativiste) est à la portée de tous. De même que la gravitation universelle et sa loi en l'inverse du carré, elle peut être rendue très intuitive, de nos jours, en utilisant la bonne approche. Les idées principales de la relativité générale, tout comme celles de la relativité restreinte, sont accessibles aux étudiants du second cycle. Les trous noirs, les ondes gravitationnelles, la courbure de l'espace-temps et les frontières de l'Univers dans son ensemble peuvent alors être appréhendés aussi facilement que l'effet Doppler ou le paradoxe des jumeaux.

Nous découvrirons que, comme la relativité restreinte qui est fondée sur l'existence d'une vitesse maximale c, la relativité générale est fondée sur une force maximale $c^4/4G$ ou sur une puissance physique maximale $c^5/4G$. Nous allons montrer, tout d'abord, que toutes les données expérimentales connues sont cohérentes avec ces limitations. En fait, nous remarquerons que la force maximale et la puissance maximale ne sont atteintes que sur des surfaces limites infranchissables : ces surfaces extrêmes sont dénommées *horizons*. Nous serons alors capables de déduire les équations du champ de la relativité générale. En particulier, l'existence d'une valeur maximum pour la force ou la puissance implique que l'espace-temps est courbé. Ceci explique pourquoi le ciel est noir la nuit et indique que l'Univers est de taille finie.

Nous discuterons également des principaux paradoxes qui surgissent de ces limites, ainsi que des arguments de ses détracteurs. Les réponses aux paradoxes nous permettront de comprendre pourquoi ces limites sont restées invisibles pendant si longtemps, à la fois dans les expériences et dans l'enseignement.

Passé cette introduction, nous étudierons les effets de la gravitation relativiste plus en détail. En particulier, nous analyserons les conséquences de la courbure de l'espace-temps sur les mouvements des corps et de la lumière dans notre environnement quotidien. Par exemple, la loi en l'inverse du carré sera remaniée. (Pouvez-vous expliquer pourquoi cela est nécessaire au vu de tout ce que nous avons appris jusqu'à présent ?) Défi 141 s
De manière totalement fascinante, nous découvrirons comment nous pouvons déplacer et courber le vide. Nous étudierons alors l'Univers dans sa globalité, et pour finir nous explorerons les formes les plus extrêmes de gravitation : les trous noirs.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

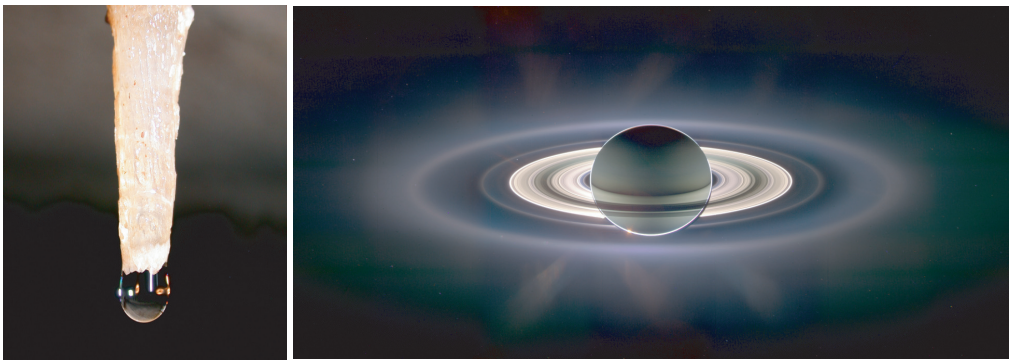


FIGURE 47 Effets de la gravitation : une stalactite qui coule (© Richard Cindric) et les anneaux de Saturne, photographiés lorsque le Soleil est masqué par la planète. (CICLOPS, JPL, ESA, NASA)

Force maximale – toute la relativité générale dans une formule

> « Un des principaux objets de la recherche théorique dans de nombreux départements scientifiques consiste à découvrir le point de vue à partir duquel le sujet étudié se manifeste dans sa plus grande simplicité. »
>
> Willard Gibbs

Réf. 78

Nous venons de voir que la théorie de la relativité *restreinte* se manifeste à partir du moment où nous reconnaissons l'existence d'une vitesse limite c dans la nature et où nous prenons cette limite comme principe fondamental. Au tournant du vingt et unième siècle, on a montré que la relativité *générale* peut être appréhendée en utilisant un principe élémentaire similaire :

Réf. 79, Réf. 81

▷ *Il existe une force maximale dans la nature :*

$$F \leqslant \frac{c^4}{4G} = 3{,}0 \cdot 10^{43}\,\mathrm{N}\,. \tag{104}$$

Dans la nature, aucune force ne peut excéder cette valeur, quel que soit le muscle, la machine ou le système qui l'exerce. Pour les curieux, la valeur de cette force limite représente l'énergie d'un trou noir (de Schwarzschild) divisée par le double de son rayon. Cette force maximale peut être comprise intuitivement en remarquant que les trous noirs (de Schwarzschild) sont les corps les plus denses possibles pour une masse donnée. Puisqu'il existe une limite à la façon dont un corps peut être comprimé, les forces – qu'elles soient gravitationnelles, électriques, centripètes ou de n'importe quel autre type – ne peuvent pas être arbitrairement grandes.

Alternativement, il est possible de faire usage d'un autre énoncé, équivalent, comme principe fondamental :

▷ *Il existe une puissance maximale dans la nature :*

$$P \leqslant \frac{c^5}{4G} = 9{,}1 \cdot 10^{51}\,\mathrm{W}\,. \tag{105}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La puissance dégagée par n'importe quel moteur, ampoule ou explosion ne peut excéder cette valeur. Cette puissance maximale est atteinte lorsqu'un trou noir (de Schwarzschild) rayonne dans l'espace durant le temps que la lumière met pour parcourir une longueur correspondant à son diamètre. Nous verrons précisément plus bas ce que sont les trous noirs et pourquoi ils sont reliés à ces valeurs limites.

Toute la théorie de la relativité générale découle de l'existence d'une force ou d'une puissance maximale. Afin de démontrer l'exactitude et l'efficacité de cette approche, une énumération d'arguments est nécessaire. Cette liste est la même que pour la démonstration de la légitimité de la vitesse limite en relativité restreinte. En premier lieu, nous devons recueillir tout témoignage observationnel sur cette prétendue limite. Deuxièmement, pour ériger cette limite en principe naturel, nous devons montrer que la relativité générale découle de celle-ci. Finalement, nous devons vérifier que cette limite s'applique dans toutes les situations possibles et imaginables. N'importe quel paradoxe apparent demandera à être résolu.

Ces trois étapes structurent cette introduction à la relativité générale. Nous commencerons cette histoire en racontant la genèse de cette idée d'une valeur limite.

Les limites d'une force et d'une puissance maximales

Au cours des dix-neuvième et vingtième siècles, de nombreux physiciens s'efforçaient d'éviter de faire appel au concept de force. Heinrich Hertz en fit une ligne directrice de ses travaux, et écrivit un ouvrage influent sur la mécanique classique sans jamais utiliser ce concept. Les pères de la théorie quantique, qui connaissaient tous ce texte, supprimèrent alors complètement le terme « force » du vocabulaire de la physique microscopique. Entre-temps, le concept de « force gravitationnelle » fut éliminé de la relativité générale, en le réduisant à une « pseudo-force ». La notion de force tomba en désuétude.

Pourtant, le principe de force maximale a un sens, pourvu que nous l'imaginions au moyen de cette définition pratique : *la force est le flux de quantité de mouvement par unité de temps*. La quantité de mouvement ne peut pas être créée ou détruite. Nous employons le mot « flux » pour nous rappeler que la quantité de mouvement, étant une quantité conservée, ne peut varier que par un écoulement vers l'intérieur ou vers l'extérieur. En d'autres termes, la variation de la quantité de mouvement se produit toujours à travers une certaine surface frontière. Cette remarque est d'une importance cruciale. À chaque fois que nous pensons à une force en un point, nous cherchons à matérialiser la quantité de mouvement qui « s'écoule » à travers une surface en ce point. La relativité générale formule habituellement cette idée comme suit : la force oblige les corps à suivre des géodésiques. Le mécanisme sous-jacent à la mesure d'une force n'est pas important. Afin de fournir un exemple concret pour éclairer cette discussion, il peut être utile d'imaginer la force comme étant d'origine électromagnétique. En réalité, n'importe quel type de force est possible.

Le principe de la force maximale se ramène ainsi à l'assertion suivante : si nous imaginons une surface physique quelconque (et que nous la recouvrons d'observateurs), l'intégrale du flux de la quantité de mouvement à travers cette surface (mesurée par tous ces observateurs) ne dépasse jamais une certaine valeur. Il importe peu de savoir comment cette surface est choisie tant qu'elle reste physique, c'est-à-dire tant que nous pouvons

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 2 Comment persuader les gens, ainsi que vous-même, qu'il existe une force maximale $c^4/4G$ (ou une puissance maximale $c^5/4G$) dans la nature.

PROBLÈME	MÉTHODE
Des valeurs de force > $c^4/4G$ ne sont pas observées	vérifiez toutes les observations
Des valeurs de force > $c^4/4G$ ne peuvent pas être produites	vérifiez toutes les tentatives possibles
Des valeurs de force > $c^4/4G$ ne sont pas locales ou ne sont pas dues à un transport d'énergie	vérifiez toutes les observations
Des valeurs de force > $c^4/4G$ ne peuvent être imaginées	résolvez tous les paradoxes
Une valeur maximale de force de $c^4/4G$ est cohérente	montrez que toutes les conséquences, même bizarres, sont confirmées par l'observation
	déduisez-en la théorie de la relativité générale

attacher des observateurs* sur celle-ci.

Ce principe impose une limite aux muscles, aux effets des marteaux, à l'écoulement de matière, à l'accélération des corps massifs, et à bien d'autres encore. Aucun système ne peut créer, mesurer ou ressentir une force supérieure à cette limite. Aucune particule, aucune galaxie et aucun bulldozer ne peuvent la surpasser.

L'existence d'une force limite possède une conséquence séduisante. Dans la nature, les forces peuvent être mesurées. Chaque mesure est une comparaison avec un standard. La force limite fournit une unité *naturelle* de force qui s'ajuste dans le système d'unités naturelles** que Max Planck dériva de c, G et h (ou $\hbar$). La force maximale fournit donc un étalon de force valable à chaque endroit de l'espace et à chaque instant du temps.

La valeur limite de $c^4/4G$ se distingue de l'unité que Planck proposa sur deux points. Premièrement, le facteur numérique est différent (Planck avait dans l'esprit la valeur c^4/G). Deuxièmement, l'unité de force est une valeur *limitante*. À cet égard, la force
Réf. 80 maximale joue le même rôle que la vitesse maximale. Comme nous le verrons plus tard, cette propriété limite est également valide pour toutes les autres unités de Planck, une
Page ?? fois que les facteurs numériques ont été correctement corrigés. Le facteur 1/4 n'a pas de signification plus profonde : c'est juste la valeur qui conduit à la forme correcte des équations du champ de la relativité générale. Ce facteur 1/4 dans la limite est également requis pour retrouver, dans des situations plus courantes, la loi en l'inverse du carré de
Page 115 la gravitation universelle. Lorsque ce facteur est correctement pris en considération, la

* Les observateurs en relativité générale, comme en relativité restreinte, sont des systèmes physiques possédant une masse qui est si petite que leur influence sur le système observé est imperceptible.

** Lorsque Planck découvrit le quantum d'action, il remarqua également qu'il était possible de définir des
Page ?? unités naturelles. Lors d'une promenade dans la forêt au voisinage de Berlin avec son fils alors âgé de sept

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

force (ou puissance) maximale est simplement donnée par l'énergie de Planck (corrigée) divisée par la longueur de Planck (corrigée) ou le temps de Planck.

L'expression de la force maximale inclut la vitesse de la lumière c et la constante gravitationnelle G ; elle peut donc être qualifiée d'expression de la gravitation relativiste. Le principe fondamental de la relativité restreinte établit que la vitesse v vérifie $v \leqslant c$ pour tous les observateurs. De manière analogue, le principe de base de la relativité générale établit que, dans tous les cas, la force F et la puissance P vérifient $F \leqslant c^4/4G$ et $P \leqslant c^5/4G$. Il importe peu que l'observateur mesure la force ou la puissance tout en se déplaçant avec une vitesse élevée par rapport au système observé, tout en étant en chute libre ou tout en étant fortement accéléré. Cependant, nous verrons qu'il est essentiel que l'observateur relève des valeurs mesurées *à son emplacement propre* et que l'observateur soit *réaliste*, c'est-à-dire constitué de matière et non séparé du système par un horizon. Ce sont les mêmes contraintes qui doivent être vérifiées par des observateurs mesurant la vitesse en relativité restreinte.

Puisque la puissance physique est la force multipliée par la vitesse, et puisque la nature fournit une vitesse limite, la borne de la force et la borne de la puissance sont équivalentes. Nous avons déjà vu que la force et la puissance apparaissent ensemble dans la définition de la quadri-force, nous pouvons donc affirmer que cette borne supérieure s'applique à chaque composante d'une force, ainsi qu'à sa grandeur. La borne de la puissance limite le débit d'énergie des moteurs des voitures et des motos, des ampoules, des lasers, des astres, des sources de rayonnement gravitationnel et des galaxies. Elle est équivalente à $1,2 \cdot 10^{49}$ chevaux-vapeur. Le principe de puissance maximale établit qu'il n'existe aucune manière de fournir ou de se débarrasser de l'énergie plus rapidement que cette borne.

Page 71

La puissance limite peut être comprise intuitivement en remarquant que chaque moteur produit des *échappements*, c'est-à-dire une certaine quantité de matière ou d'énergie qui est délaissée. Pour une ampoule, une étoile ou un trou noir en évaporation, les échappements sont les rayonnements émis. Pour une voiture ou un moteur à réaction ce sont des gaz chauds, pour une turbine à eau l'échappement est l'eau qui se déplace lentement en quittant la turbine, pour une fusée c'est la matière éjectée à son extrémité arrière, pour un photon qui fuse ou un moteur électrique, c'est l'énergie électromagnétique. À chaque fois que la puissance d'un moteur se rapproche de la valeur limite, les échappements s'accroissent de façon drastique en termes de masse–énergie. Pour des masses dégagées extrêmement élevées, l'attraction gravitationnelle issue de ces échappements – même s'ils ne sont que rayonnements – empêche une accélération supplémentaire du moteur par rapport à ceux-ci. Le principe de puissance maximale exprime donc le fait qu'il existe un mécanisme automatique de freinage dans la nature, ce mécanisme de ralentissement est la gravité.

De plus, une autre limite analogue surgit lorsque la puissance maximale est divisée par c^2.

▷ *Il existe un taux maximum de variation de la masse dans la nature :*

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \leqslant \frac{c^3}{4G} = 1{,}0 \cdot 10^{35}\,\mathrm{kg/s}\,. \tag{106}$$

ans, il lui déclara qu'il avait fait une découverte aussi importante que celle de la gravitation universelle.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Cette borne impose une limite aux pompes, aux moteurs à réaction et à ceux qui mangent très rapidement. En réalité, le débit d'écoulement de l'eau ou d'une matière quelconque à l'intérieur des conduits est restreint. La limite de l'écoulement de masse est manifestement équivalente à l'une des deux limites, de la force ou de la puissance.

Cette revendication d'une force, puissance ou variation de masse maximale dans la nature semble presque trop saugrenue pour être vraie. Notre première tâche consiste par conséquent à la vérifier empiriquement de la manière la plus complète possible.

L'ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

De même que le principe de vitesse maximale, le principe de force maximale doit en premier lieu être contrôlé de manière expérimentale. Michelson a consacré une grande partie de sa vie de chercheur à rechercher des variations possibles dans la valeur de la vitesse de la lumière. Personne n'a jusqu'à présent consacré autant d'efforts à tester la force ou la puissance maximale. Toutefois, il faut reconnaître honnêtement qu'aucune expérience, qu'elle soit microscopique, macroscopique ou astronomique, n'a jamais mesuré des valeurs de force supérieures à la limite établie. De nombreuses personnes ont prétendu avoir réalisé des vitesses plus grandes que celle de la lumière. Jusque-là, personne n'a jamais proclamé avoir produit une force plus importante que la valeur limite.

Les accélérations colossales que les particules éprouvent lors des collisions à l'intérieur du Soleil, dans les accélérateurs les plus puissants ou dans les réactions induites par les rayons cosmiques correspondent à des grandeurs de forces beaucoup plus petites que la force limite. Il en est de même pour les neutrons dans les étoiles à neutrons, pour les quarks à l'intérieur des protons, et pour toute la matière qui a été observée en train de chuter en direction des trous noirs. En outre, la recherche de singularités de l'espace-temps, qui pourraient permettre à des forces d'atteindre ou de dépasser la force limite, est restée infructueuse.

Dans le domaine astronomique, toutes les forces qui agissent entre les étoiles ou les galaxies se situent en deçà de la valeur limite, comme le sont les forces qui agissent en leur sein. Même les interactions qui agissent entre deux moitiés quelconques de l'Univers n'excèdent pas la limite, à condition qu'une division physiquement raisonnable entre les deux moitiés soit prise en compte. (La signification de « division physiquement raisonnable » sera donnée ci-après, pour des divisions qui *ne* sont *pas* raisonnables, des exceptions à cette exigence de force maximale *peuvent* être construites. Vous devriez vous amuser à rechercher une telle exception.)

Page 113

Défi 142 s

Les astronomes ne sont également pas parvenus à découvrir une quelconque région de l'espace-temps dont la courbure (une notion qui est introduite plus bas) est assez grande pour permettre aux forces de surpasser la force limite. En fait, aucune des très nombreuses observations récentes des trous noirs n'a permis de révéler des forces supérieures à la valeur limite ou des objets plus petits que le rayon du trou noir correspondant. Les observations n'ont pareillement pas réussi à trouver une situation qui pourrait permettre à un observateur rapide d'observer une grandeur de force qui dépasse la limite, grâce au facteur d'impulsion relativiste.

La limite à la puissance peut aussi être vérifiée expérimentalement. Il apparaît que la puissance – ou la luminosité – des étoiles, des quasars, des pulsars binaires, des sursauts gamma, des galaxies ou des amas de galaxies peut en réalité représenter une fraction

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

significative de la puissance limite. Toutefois, aucune violation de cette frontière n'a été
Réf. 82 constatée jusqu'à présent. En fait, la somme de toute la lumière émise par tous les astres de l'Univers ne dépasse pas la limite. De la même manière, les sources les plus intenses d'ondes gravitationnelles, des trous noirs qui fusionnent, n'excèdent pas la puissance limite. Seule la luminosité des trous noirs qui s'évaporent, dans leur phase terminale, peuvent égaler cette limite. Mais, jusqu'à ce jour, on n'en a jamais observé. (Le fait que des sources dans l'Univers puissent à elles seules approcher la puissance limite, alors que l'Univers tout entier doit également obéir à celle-ci, constitue le paradoxe de la puissance.
Page 113 Nous en dirons plus ci-dessous.)

De façon similaire, tous les débits d'écoulement de masse observés ont des ordres de grandeur inférieurs à la limite associée. Même des systèmes physiques qui sont les analogues mathématiques des trous noirs – par exemple, des trous noirs acoustiques silencieux ou des trous noirs optiques – n'infirment pas les limites à la force et à la puissance, lesquelles sont vérifiées dans les systèmes correspondants.

La réalité expérimentale est quelque peu décevante. Les expériences ne contredisent pas les valeurs limites. Mais ces données ne les confirment pas non plus. La raison en est que dans la vie quotidienne et dans les systèmes expérimentalement accessibles, les horizons sont absents. Nous rencontrons la vitesse maximale à la base de la relativité restreinte presque partout, la force maximale et la puissance maximale ne se manifestent
Page 119 presque nulle part. Nous proposerons ci-dessous quelques tests consacrés aux limites qui pourraient être atteintes à l'avenir.

En déduire la relativité générale*

Afin d'ériger les limites de la force et de la puissance maximales en principes physiques fondamentaux, il n'est pas suffisant de montrer qu'elles sont cohérentes avec ce que nous observons dans la nature. Il est nécessaire de vérifier qu'elles impliquent la théorie complète de la relativité générale. (Cette section est destinée uniquement aux lecteurs qui connaissent déjà les équations du champ de la relativité générale. Les autres devraient
Page 103 passer à la section suivante.)

Afin de déduire la théorie de la relativité, nous avons besoin d'étudier minutieusement les systèmes qui *réalisent* cette limite. Dans le cas de la théorie restreinte de la relativité, le système principal qui réalise la vitesse limite est la lumière. Pour cette raison, la lumière est primordiale dans l'exploration de la relativité restreinte. Dans le cas de la relativité générale, les systèmes qui réalisent cette limite sont moins évidents. Nous remarquons tout d'abord qu'une force (ou puissance) maximale ne peut pas être réalisée dans tout un *volume* d'espace. Si cela était possible, une simple poussée de Lorentz** pourrait transformer cette force (ou puissance) en une valeur plus élevée. Par conséquent, la nature ne peut réaliser de force et de puissance maximales que sur des surfaces, non sur des volumes. De plus, ces surfaces doivent être inaccessibles. Ces surfaces inaccessibles sont
Réf. 80 élémentaires pour la relativité générale, elles sont appelées *horizons*. La force et la puissance maximales n'apparaissent que sur des horizons. Nous avons rencontré ceux-ci en
Page 85 relativité restreinte, où ils étaient définis comme des surfaces qui imposent des limites

* Cette section peut être sautée en première lecture. (La preuve mentionnée date de décembre 2003.)

** Une *poussée de Lorentz* a été définie en relativité restreinte comme un changement de point de vue pour un deuxième observateur *se déplaçant* par rapport au premier.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

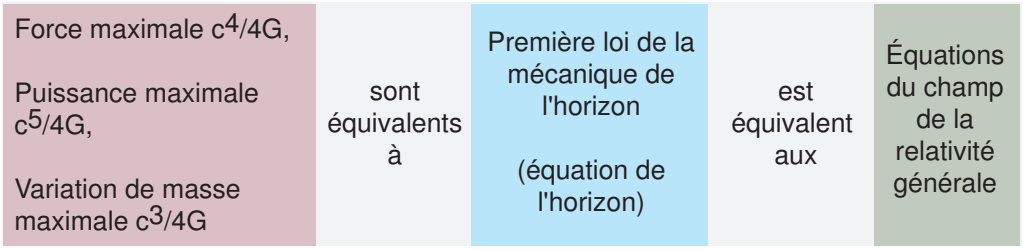


FIGURE 48 Présentation de l'équivalence de la force ou puissance maximale avec les équations du champ de la relativité générale.

à l'observation. (Remarquez le contraste avec la vie courante, où un horizon est simplement une ligne, et non une surface.) Cette définition d'un horizon comme étant une surface de force (ou puissance) maximale est équivalente à la définition d'une surface au-delà de laquelle aucun signal ne peut être reçu. Dans les deux cas, un horizon est une surface au-delà de laquelle l'interaction demeure impossible.

La correspondance entre les horizons et la force maximale est un point capital de la gravitation relativiste. Elle est aussi importante que le rapport qui existe entre la lumière et la vitesse maximale en relativité restreinte. Dans celle-ci, nous avons montré que le fait que la vitesse de la lumière soit la vitesse maximale dans la nature implique la transformation de Lorentz. En relativité générale, nous allons maintenant démontrer que la force maximale dans la nature, que nous pouvons baptiser *force de l'horizon*, implique les équations du champ de la relativité générale. Pour atteindre cet objectif, nous commençons avec la remarque pertinente qu'un flux d'énergie traverse tous les horizons. Ce flux dépend de la courbure de l'horizon, comme nous le verrons. Cette correspondance implique que des horizons ne peuvent être plats, puisqu'un plan s'étendant à l'infini impliquerait un flux infini d'énergie.

La déduction des équations de la relativité générale ne se fait qu'en deux étapes, comme l'indique la Figure 48. Dans la première, on montre que le principe de force ou puissance maximale implique la première « loi » de la mécanique de l'horizon. Dans la seconde, on montrera que cette première « loi » implique les équations du champ de la relativité générale.

L'horizon fini le plus simple est une sphère statique, correspondant à un trou noir de Schwarzschild. Un horizon sphérique est caractérisé par son rayon de courbure R ou, de manière équivalente, par sa gravité de surface a. Ces deux quantités sont reliées par $2aR = c^2$. Maintenant, l'écoulement d'énergie à travers n'importe quel horizon est toujours fini par extension lorsqu'il est mesuré le long de la direction de propagation. Nous pouvons alors parler plus précisément d'une impulsion d'énergie. Toute impulsion d'énergie qui traverse un horizon est donc caractérisée par une énergie E et une longueur propre L. Lorsque cette impulsion d'énergie s'écoule perpendiculairement à travers un horizon, le taux de variation de la quantité de mouvement, ou la force, pour un observateur situé sur l'horizon est

$$F = \frac{E}{L} \,. \tag{107}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Notre but est de montrer que l'existence d'une force maximale implique la relativité générale. Maintenant, la force maximale est réalisée sur des horizons. Nous avons ainsi besoin d'insérer les valeurs maximales possibles de chaque côté de l'équation (107) et de montrer que la relativité générale en découle.

En utilisant la valeur de la force maximale et l'aire $4\pi R^2$ pour un horizon sphérique, nous obtenons :

$$\frac{c^4}{4G} = \frac{E}{LA} 4\pi R^2 \,. \tag{108}$$

La fraction E/A représente l'énergie par unité de surface s'écoulant à travers n'importe quelle aire A qui est une partie d'un horizon. L'insertion des valeurs maximales est achevée lorsque nous remarquons que la longueur L de l'impulsion d'énergie est restreinte par le rayon R. La limite $L \leqslant R$ découle de considérations géométriques : vue depuis le côté concave de l'horizon, l'impulsion doit être plus courte que le rayon de courbure. Un argument indépendant est le suivant. La longueur L d'un objet accéléré d'un facteur
Réf. 83 a est limitée, par la relativité restreinte, par $L \leqslant c^2/2a$. La relativité restreinte montre déjà que cette limite est associée à l'émergence d'un horizon. Avec la relation (108), l'allégation que les horizons sont des surfaces de force maximale conduit à la relation importante suivante pour des horizons sphériques et statiques :

$$E = \frac{c^2}{8\pi G} a A \,. \tag{109}$$

Cette *équation de l'horizon* relie le flux d'énergie E qui traverse une surface A d'un horizon sphérique à la gravité de surface a. Elle établit que l'énergie qui s'écoule à travers un horizon est limitée, que cette énergie est proportionnelle à l'aire de cet horizon, et que le flux d'énergie est proportionnel à la gravité de surface. (L'équation de l'horizon est également appelée *première loi de la mécanique du trou noir* ou *première loi de la*
Réf. 84 *mécanique de l'horizon*.)

La dérivation ci-dessus conduit également au résultat intermédiaire suivant :

$$E \leqslant \frac{c^4}{16\pi G} \frac{A}{L} \,. \tag{110}$$

Cette variante de l'équation de l'horizon formule plus clairement le fait qu'aucune surface autre qu'un horizon ne peut parvenir au flux d'énergie maximal, lorsque l'aire et la longueur de l'impulsion (ou la gravité de surface) sont données. Aucun autre domaine de la physique ne fait de déclarations comparables : elles sont intrinsèques à la théorie de la gravitation.

Une dérivation alternative de l'équation de l'horizon peut débuter en mettant l'accent sur la puissance au lieu de la force, en utilisant $P = E/T$ comme équation de départ.

Il est important de souligner que les équations de l'horizon (109) et (110) découlent uniquement de deux hypothèses : premièrement, il existe une vitesse maximale dans la nature et, deuxièmement, il existe une force (ou puissance) maximale dans la nature. Aucune théorie spécifique de la gravitation n'est présumée. L'équation de l'horizon pourrait même être testée de manière expérimentale, comme il est argumenté ci-dessous.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

(Nous remarquons également que l'équation de l'horizon – ou, de façon équivalente, la force ou puissance limite – implique un taux de variation de masse maximal dans la nature donné par $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t \leqslant c^3/4G$.)

Ensuite, nous devons généraliser l'équation de l'horizon, des horizons sphériques et statiques aux horizons généraux. Puisque la force maximale est supposée valide pour *tous* les observateurs, qu'ils soient au repos ou accélérés, la généralisation est immédiate. Pour un horizon dont la courbure est irrégulière ou variable au cours du temps, l'équation de l'horizon devient :

$$\delta E = \frac{c^2}{8\pi G}\, a\, \delta A \,. \tag{111}$$

Cette relation différentielle – qui devrait être baptisée *équation généralisée de l'horizon* – est valable pour un horizon quelconque. Elle peut être appliquée séparément pour chaque morceau δA d'un horizon spatialement ou dynamiquement variable. L'équation généralisée de l'horizon (111) a été comprise comme étant équivalente à la relativité générale au moins depuis 1995, lorsque cette équivalence fut (implicitement) démontrée par Réf. 85 Jacobson. Nous montrerons que cette équation différentielle de l'horizon joue le même rôle pour la relativité générale que l'équation $\mathrm{d}x = c\,\mathrm{d}t$ pour la relativité restreinte. Désormais, lorsque nous évoquerons l'équation de l'horizon, nous sous-entendrons la forme différentielle générale (111) de cette relation.

Il est instructif de reformuler le comportement des impulsions d'énergie de longueur L d'une manière qui reste valable pour n'importe quelle surface, même s'il ne s'agit pas d'un horizon. En réitérant la dérivation précédente, nous obtenons

$$\frac{\delta E}{\delta A} \leqslant \frac{c^4}{16\pi G}\,\frac{1}{L} \,. \tag{112}$$

L'égalité est réalisée uniquement quand la surface A est un horizon. En d'autres termes, à chaque fois que la valeur $\delta E/\delta A$ dans un système physique approche celle du membre de droite, un horizon commence à se former. Cette correspondance sera essentielle dans notre discussion sur les contradictions apparentes des principes limites.

Si nous nous souvenons que, sur un horizon, la longueur L de l'impulsion vérifie $L \leqslant c^2/2a$, il devient clair que l'équation généralisée de l'horizon est une conséquence de la force maximale $c^4/4G$ ou de la puissance maximale $c^5/4G$. De plus, l'équation de l'horizon prend aussi en compte la vitesse maximale, laquelle est à l'origine de la relation $L \leqslant c^2/2a$. L'équation de l'horizon découle donc complètement de ces deux limites de la nature.

La partie restante de l'argumentation est tout simplement la dérivation de la relativité générale à partir de l'équation généralisée de l'horizon. Cette déduction fut tacitement Réf. 85 conduite par Jacobson, et les étapes indispensables en sont données dans les paragraphes qui suivent. (Jacobson n'avait pas insisté sur le fait que sa dérivation était aussi valable pour un espace-temps continu, ou que son argument pouvait aussi être utilisé en relativité générale classique.) Pour visualiser le rapport qui existe entre l'équation généralisée de l'horizon (111) et les équations du champ, nous avons juste besoin de généraliser cette équation aux systèmes de coordonnées généralisées et aux directions quelconques du flux de l'énergie–impulsion. Nous y parvenons en introduisant la notation tensorielle qui est

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

adaptée à l'espace-temps courbé.

Pour étendre l'équation généralisée de l'horizon, nous introduisons l'élément général de surface $\mathrm{d}\Sigma$ et le champ vectoriel de Killing k de la poussée de Lorentz locale qui engendre l'horizon (avec la norme appropriée). Jacobson utilisa ces deux quantités pour récrire le membre de gauche de l'équation généralisée de l'horizon (111) comme suit :

$$\delta E = \int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \,, \tag{113}$$

où T_{ab} représente le tenseur énergie–impulsion. Cette expression donne manifestement l'énergie à l'horizon pour des systèmes de coordonnées arbitraires et des directions quelconques du flux d'énergie.

Le principal résultat de Jacobson est que le facteur $a\,\delta A$ dans la partie droite de l'équation généralisée de l'horizon (111) peut être reformulé, en tirant profit de l'équation de Raychaudhuri (purement géométrique), comme suit :

$$a\,\delta A = c^2 \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \,, \tag{114}$$

où R_{ab} est le tenseur de Ricci décrivant la courbure de l'espace-temps. Cette relation décrit comment les propriétés locales de l'horizon dépendent de la courbure locale.

En combinant ces deux étapes, l'équation généralisée de l'horizon (111) devient

$$\int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b = \frac{c^4}{8\pi G} \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \,. \tag{115}$$

Jacobson montra alors que cette équation, combinée avec la conservation locale de l'énergie (c'est-à-dire l'annulation de la divergence du tenseur énergie–impulsion), ne peut être satisfaite que si

$$T_{ab} = \frac{c^4}{8\pi G} \left(R_{ab} - (\frac{R}{2} + \Lambda) g_{ab} \right) \,, \tag{116}$$

où R représente le scalaire de Ricci et Λ est une constante d'intégration pour laquelle la valeur n'est pas déterminée par ce problème. Les équations ci-dessus constituent les équations complètes du champ de la relativité générale, incluant la constante cosmologique Λ. Les équations du champ résultent donc de l'équation de l'horizon. Elles sont par conséquent représentées comme étant valides aux horizons.

Puisqu'il est possible, en choisissant une transformation de coordonnées appropriée, de placer un horizon à n'importe quel point souhaité de l'espace-temps, les équations du champ doivent être valables partout, dans tout l'espace-temps. Cette observation achève l'argumentation de Jacobson. Puisque les équations du champ découlent, via l'équation de l'horizon, du principe de force maximale, nous avons également démontré qu'à chaque point de l'espace-temps dans la nature la même force maximale s'applique : la valeur de la force maximale est un invariant et une constante de la nature.

En d'autres termes, les équations du champ de la relativité générale sont une conséquence directe de la limite sur le flux d'énergie aux horizons, lequel en fin de compte est dû à l'existence d'une force (ou puissance) maximale. En réalité, comme Jacobson

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

le montra, l'argument fonctionne dans les deux sens. La force (ou puissance) maximale, l'équation de l'horizon et la relativité générale sont équivalentes.

En bref, *le principe de force maximale représente une manière simple d'exprimer le fait que, sur des horizons, le flux d'énergie est proportionnel à l'aire et à la gravité de surface.* Cette correspondance permet de déduire complètement la théorie de la relativité générale. En particulier, une valeur de force maximale est suffisante pour indiquer à l'espace-temps comment il doit être courbé. Nous explorerons les particularités de cette relation sous peu. Remarquez que si aucune force limite n'existait dans la nature il serait possible de « prélever » n'importe quelle quantité souhaitée d'énergie à travers une surface donnée, comprenant n'importe quel horizon. Dans ce cas, le flux d'énergie ne serait pas proportionnel à l'aire, les horizons n'auraient pas les propriétés qu'ils ont, et la relativité générale ne pourrait pas s'appliquer. Nous avons ainsi une idée de la manière dont le flux maximal d'énergie, le flux maximal d'impulsion et le flux maximal de masse sont associés aux horizons. Ce lien est plus évident pour des trous noirs, où l'énergie, l'impulsion ou la masse sont ce qui tombe dans le trou noir.

Page 243

Par ailleurs, puisque la dérivation de la relativité générale à partir du principe de force maximale ou à partir du principe de puissance maximale est dorénavant bien établie, nous pouvons baptiser à juste titre ces limites *force de l'horizon* et *puissance de l'horizon*. Toute confirmation expérimentale ou théorique des équations du champ confirme indirectement leur existence.

L'ESPACE-TEMPS EST COURBÉ

Imaginez deux observateurs qui commencent à se déplacer parallèlement l'un à l'autre et qui continuent à avancer en ligne droite. Si, après un moment, ils découvrent qu'ils ne se déplacent plus parallèlement l'un à l'autre, alors ils peuvent en déduire qu'ils se sont déplacés sur une surface incurvée (essayez !) ou dans un espace courbé. En particulier, cela se produit près d'un horizon. La dérivation précédente a montré qu'une force maximale finie implique que tous les horizons sont courbes ; la courbure des horizons entraîne ensuite la courbure de l'espace-temps. Si la nature n'avait que des horizons plats, il n'y aurait pas d'espace-temps courbe. L'existence d'une force maximale implique que l'espace-temps est courbé.

Défi 143 s

Un horizon si fortement courbé qu'il forme une frontière fermée, comme la surface d'une sphère, est appelé un trou noir. Nous étudierons les trous noirs en détail plus loin. La propriété principale d'un trou noir, comme celle de n'importe quel horizon, est qu'il est impossible de définir ce qui se trouve « derrière » la frontière*.

Page 241

L'analogie qui existe entre relativité restreinte et relativité générale peut être poussée plus loin. En relativité restreinte, la vitesse maximale implique $\mathrm{d}x = c\,\mathrm{d}t$, et la variation du temps dépend de l'observateur. En relativité générale, la force (ou puissance) maximale implique l'équation de l'horizon $\delta E = \frac{c^2}{8\pi G}\, a\, \delta A$ et l'observation que l'espace-temps est courbé.

La force (ou puissance) maximale possède donc le même double rôle en relativité générale que la vitesse maximale en relativité restreinte. Dans celle-ci, la vitesse de la lumière est la vitesse maximale, elle représente également la constante de proportionnalité

* De façon analogue, il est impossible en relativité restreinte de détecter ce qui se déplace plus vite que la limite de la lumière.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

qui relie l'espace et le temps, comme le souligne l'équation $dx = c\,dt$. En relativité générale, la force de l'horizon est la force maximale ; elle apparaît également (avec un facteur 2π) dans les équations du champ comme étant la constante de proportionnalité qui relie l'énergie et la courbure. La force maximale décrit donc à la fois l'élasticité de l'espace-temps et – si nous employons la représentation simple de l'espace-temps comme étant un milieu dans lequel nous sommes baignés – la tension maximale à laquelle l'espace-temps peut être soumis. Ce double rôle d'une constante matérielle comme facteur de proportionnalité et comme valeur limite est bien connu dans les sciences de la matière.

Cette similitude vous fait penser à l'éther ? Ne vous inquiétez pas : la physique n'a pas
Page 108 besoin du concept d'éther, parce qu'il est indiscernable du vide. La relativité générale décrit l'espace vide comme une sorte de milieu qui peut être déformé et déplacé.

Pourquoi la force maximale est-elle également le facteur de proportionnalité entre la courbure et l'énergie ? Imaginez l'espace-temps comme un matériau élastique. L'élasticité d'un matériau est décrite par une constante matérielle numérique. La définition la plus simple de cette constante matérielle est le rapport entre la contrainte (la force par unité de surface) et la déformation (la variation relative de la longueur). Une définition exacte doit prendre en compte la géométrie de la situation. Par exemple, le module de cisaillement G (ou μ) décrit la difficulté à déplacer deux surfaces parallèles d'un matériau l'une contre l'autre. Si une force F est nécessaire pour déplacer deux surfaces parallèles d'aire A et de longueur l l'une contre l'autre d'une distance Δl, alors nous définissons le module de cisaillement G par

$$\frac{F}{A} = G\frac{\Delta l}{l} \,. \tag{117}$$

Le module de cisaillement pour les métaux et les alliages varie entre 25 et 80 GPa. La théorie des milieux continus appliquée aux solides montre que, pour n'importe quel solide cristallin dépourvu d'impuretés (un solide « parfait »), il existe une contrainte de cisaillement théorique : lorsqu'on applique des contraintes supérieures à cette valeur, le matériau cède. La contrainte de cisaillement théorique, en d'autres mots la contrainte maximale dans un matériau, est donnée par

$$G_{\text{cct}} = \frac{G}{2\pi} \,. \tag{118}$$

La contrainte maximale est donc principalement donnée par le module de cisaillement. Cette correspondance est similaire à celle que nous avons rencontrée pour le vide. En réalité, imaginer le vide comme un milieu matériel qui peut être tordu est un procédé
Réf. 86 utile pour mieux comprendre la relativité générale. Nous l'utiliserons régulièrement par la suite.

Que se passe-t-il quand on exerce une contrainte sur le vide avec la force maximale ? Est-il également déchiré comme un solide ? Oui : en réalité, lorsque le vide est déchiré, des particules surgissent. Nous en saurons plus à propos de ce phénomène plus tard : puisque les particules sont des entités quantiques, nous avons d'abord besoin d'étudier la théorie quantique avant que nous puissions en décrire les effets dans la dernière partie de notre ascension montagneuse.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Conditions de validité des limites de la force et de la puissance

La valeur de la force maximale est valable uniquement sous certaines conditions. Pour éclaircir ce point, nous pouvons la comparer à la vitesse maximale. La vitesse de la lumière (dans le vide) est une borne supérieure pour le mouvement des systèmes simplement dotés d'une *quantité de mouvement* ou d'une *énergie*. Elle peut, cependant, être dépassée pour des mouvements de points immatériels. En réalité, le point de découpage d'une paire de ciseaux, un point de lumière laser sur la Lune, la vitesse de groupe ou la
Page 51 vitesse de phase de paquets d'ondes peuvent dépasser la vitesse de la lumière. De plus, la vitesse de la lumière est une limite uniquement si elle est mesurée *près* de la masse ou de l'énergie qui se déplace : la Lune avance plus vite que la lumière si nous faisons un tour sur nous-mêmes en une seconde, des points éloignés dans un univers de Friedmann s'éloignent les uns des autres avec des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière. Finalement, l'observateur doit être *réaliste* : il doit être constitué de matière et d'énergie, il doit donc avancer plus lentement que la lumière, et doit être capable d'observer le système. Aucun système se déplaçant à une vitesse égale ou supérieure à celle de la lumière
Réf. 87 ne peut représenter un observateur.

Ces trois mêmes conditions s'appliquent en relativité générale. En particulier, la gravitation relativiste interdit l'existence d'observateurs et de masses ponctuels : ils ne sont pas réalistes. Des surfaces se déplaçant plus vite que la lumière ne sont également pas réalistes. Dans ces cas, nous pouvons trouver des contradictions à l'idée de la force maximale. Essayez d'en découvrir une – de nombreuses sont possibles, et elles sont toutes
Défi 144 s fascinantes. Nous en explorerons quelques-unes parmi les plus importantes ci-après.

Un autre point mériterait d'être mentionné. La relativité générale implique une puissance et une force maximales. La déduction inverse, celle des équations du champ de la relativité générale à partir de la force ou puissance maximale, est correcte uniquement sous l'hypothèse que la gravitation est purement géométrique. C'est l'énoncé primordial de la relativité générale. Si le mécanisme de la gravitation était fondé sur d'autres champs, tels que des particules inconnues jusqu'ici, l'équivalence entre la gravitation et une force maximale ne pourrait être établie.

Expériences de pensée et paradoxes sur la force limite

> « Wenn eine Idee am Horizonte eben aufgeht, ist gewöhnlich die Temperatur der Seele dabei sehr kalt. Erst allmählich entwickelt die Idee ihre Wärme, und am heissesten ist diese (das heisst sie tut ihre grössten Wirkungen), wenn der Glaube an die Idee schon wieder im Sinken ist. »
> Friedrich Nietzsche*

* « Quand une idée émerge tout juste à l'horizon, la température de l'esprit par rapport à celle-ci est habituellement très froide. Ce n'est que petit à petit que l'idée développe sa chaleur, et elle est la plus chaude (ce qui signifie qu'elle exerce sa plus forte influence) lorsque la conviction dans cette idée est déjà une nouvelle fois en train de décliner. » Friedrich Nietzsche (1844–1900) fut un philosophe et savant allemand. Cette phrase est l'aphorisme 207 – *Sonnenbahn der Idee* – tiré de son ouvrage *Menschliches Allzumenschliches – Der Wanderer und sein Schatten*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La dernière étape, bien que cruciale, dans notre discussion de la force limite est la même que dans la discussion de la vitesse limite. Nous avons besoin de montrer que n'importe quelle expérience *concevable* – pas seulement une qui soit réelle – vérifie l'hypothèse. Selon une convention qui remonte au début du vingtième siècle, une telle expérience imaginaire est dénommée une *expérience de pensée*, en anglais on dit « Gedanken experiment » d'après l'expression allemande « Gedankenexperiment ».

Pour invalider toutes les tentatives concevables permettant de dépasser la vitesse maximale, il suffit d'étudier les propriétés de l'addition des vitesses et la divergence de l'énergie cinétique près de la vitesse de la lumière. Dans le cas de la force maximale, la tâche est beaucoup plus compliquée. En effet, énoncer une force maximale, une puissance maximale et une variation maximale de masse engendre facilement de nombreuses tentatives pour les contredire. Nous allons maintenant discuter de quelques-unes d'entre elles.

* *

L'approche brutale de la force. La tentative la plus simple pour dépasser la force limite est de tenter d'accélérer un objet avec une force plus élevée que la valeur maximale. Maintenant, l'accélération implique le transfert de l'énergie. Ce transfert est limité par l'équation de l'horizon (111) ou par la limite (112). Pour chaque tentative de surpasser cette force limite, l'écoulement de l'énergie engendre l'apparition d'un horizon. Mais un horizon empêche cette force de dépasser la limite, parce qu'elle impose une borne à l'interaction.

Nous pouvons explorer directement cette limite. En relativité restreinte, nous avons
Page 88 remarqué que l'accélération d'un objet est restreinte par sa longueur. En fait, à une distance donnée par $c^2/2a$ dans la direction opposée à l'accélération a, un *horizon* se forme. En d'autres termes, un corps accéléré se brise, au plus tard, en ce point. La force F qui agit sur un corps de masse M et de rayon R est donc limitée par

$$F \leqslant \frac{M}{2R}\, c^2 \,. \tag{119}$$

L'ajout des effets (généralement minuscules) de la gravitation est immédiat. Pour être observable, un corps accéléré doit demeurer *plus gros* qu'un trou noir ; en y insérant le rayon correspondant $R = 2GM/c^2$, nous obtenons la force limite (104). Des tentatives *dynamiques* pour dépasser la force limite échouent donc forcément.

* *

La tentative par la corde. Nous pouvons aussi essayer de produire une force plus élevée dans une situation *statique*, par exemple en tirant sur les deux extrémités d'une corde dans des directions opposées. Nous supposons pour simplifier qu'une corde incassable puisse exister. Pour produire une force dépassant la valeur limite, nous avons besoin d'emmagasiner une très grande énergie (élastique) dans cette corde. Cette énergie doit être introduite à partir des extrémités. Lorsque nous augmentons la tension de la corde vers des grandeurs de plus en plus élevées, de plus en plus d'énergie (élastique) doit être stockée dans des distances de plus en plus petites. Pour surpasser la force limite, nous aurions besoin d'ajouter plus d'énergie par unité de distance et de surface que celle qui est permise par l'équation de l'horizon. Un horizon surgit donc inévitablement. Mais il n'existe aucune manière de tendre une corde à travers un horizon, même si elle est

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

incassable. Un horizon conduit soit à la brisure de la corde, soit à son détachement du système de traction. Des horizons interdisent donc de générer des forces supérieures à la force limite. En réalité, l'hypothèse d'une puissance filaire infinie n'est pas nécessaire : la force limite ne peut pas être dépassée même si la puissance contenue dans un fil est finie.

Nous remarquons qu'il n'est pas important que la force appliquée soit une force qui tire – comme pour les cordes ou les fils – ou qui pousse. Si nous *poussons* deux objets l'un contre l'autre, une tentative pour accroître sans fin la valeur de la force conduira également à la formation d'un horizon, à cause de la limite imposée par l'équation de l'horizon. Par définition, cela se produit précisément au moment où la force limite est atteinte. Comme il n'y a aucune manière de pousser (ou tirer) quelque chose en présence d'un horizon, la tentative pour atteindre une force plus élevée s'achève une fois que l'horizon s'est formé. Des forces statiques ne peuvent pas dépasser la valeur limite.

* *

L'essai par le freinage. Une force limite impose une variation maximale de la quantité de mouvement par unité de temps. Nous pouvons donc rechercher une manière de *stopper* un système physique en mouvement si brutalement que la force maximale devrait être surpassée. L'inexistence de corps rigides dans la nature, déjà mise en évidence avec la relativité restreinte, rend impossible le fait de s'arrêter subitement, mais la relativité restreinte ne donne en elle-même aucune limite inférieure pour le temps de freinage. Toutefois, l'introduction de la gravitation le fait. Arrêter un système mobile implique un transfert d'énergie. Le flux d'énergie par unité de surface ne peut pas dépasser la valeur fournie par l'équation de l'horizon. Par conséquent, nous ne pouvons pas dépasser la force limite en freinant un objet.

Page 88

De la même manière, si un système rapide est *réfléchi* au lieu d'être stoppé, une certaine quantité d'énergie exige d'être transférée et emmagasinée pendant un court instant. Par exemple, lorsqu'une balle de tennis rebondit sur un grand mur, sa quantité de mouvement est modifiée et une force est appliquée. Si un grand nombre de balles identiques rebondissent en même temps, une force assurément plus grande que la limite peut-elle être réalisée ? Il apparaît que c'est impossible. Si nous le tentions, l'énergie qui est transférée au mur parviendrait à la limite donnée par l'équation de l'horizon et engendrerait alors un horizon. Dans ce cas, la réflexion ne serait plus possible. Donc la limite ne peut pas être dépassée.

* *

La tentative par le rayonnement classique. À la place de systèmes qui tirent, poussent, freinent ou réfléchissent la *matière*, nous pouvons explorer des systèmes dans lesquels c'est le *rayonnement* qui est concerné. Cependant, l'argumentation se tient exactement de la même manière, que soient mis en jeu des photons, des gravitons ou d'autres particules. En particulier, les miroirs, comme les murs, sont limités dans leurs facultés.

Il est également impossible de produire une force supérieure à la force maximale en concentrant une grande quantité de lumière sur une surface. La même situation que pour les balles de tennis se manifeste : quand la valeur limite E/A donnée par l'équation de l'horizon (112) est obtenue, un horizon apparaît, empêchant la limite d'être enfreinte.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

La tentative avec des briques. Les limites de la force et de la puissance peuvent également être testées avec des expériences de pensée plus tangibles. Nous pouvons tenter de dépasser la force limite en entassant des poids. Mais même bâtir une tour en brique infiniment haute n'engendre pas une force suffisamment forte au niveau de ses fondations : en intégrant le poids, en prenant en considération sa décroissance avec la hauteur, on produit une valeur finie qui ne peut pas parvenir à la force limite. Si nous augmentons continuellement la densité des briques, nous avons besoin de prendre en compte le fait que la tour et la Terre se transformeront en un trou noir. Et les trous noirs, comme mentionné ci-dessus, n'autorisent pas le dépassement de la force limite.

* *

L'essai avec la poussée de Lorentz. Une poussée peut apparemment être choisie de telle manière qu'une valeur de force F dans un référentiel soit transformée en n'importe
Réf. 88 quelle valeur souhaitée F' dans un autre référentiel. Toutefois, ce résultat n'est pas physique. Pour être plus concret, imaginez un observateur massif, mesurant la valeur F, au repos par rapport à une grande masse, et un second observateur se déplaçant en direction de cette masse conséquente avec une vitesse relativiste, mesurant la valeur F'. Les deux observateurs peuvent être imaginés comme étant aussi petits qu'on le désire. Si nous convertissons le champ de force au repos F en appliquant la transformation de Lorentz, la force F' pour l'observateur mobile peut atteindre des valeurs extrêmement élevées, à condition que la vitesse soit suffisamment grande. Cependant, une force doit être mesurée par un observateur situé en un point précis. Nous devons par conséquent vérifier ce qui se passe quand l'observateur rapide avance en direction de la région où la force est supposée dépasser la force limite. Imaginez que l'observateur possède une masse m et un rayon r. Pour être un observateur digne de ce nom, il doit être plus grand qu'un trou noir ; en d'autres termes, son rayon doit vérifier $r > 2Gm/c^2$, ce qui implique que cet observateur possède une taille non négligeable. Lorsque celui-ci plonge dans le champ de force entourant la sphère, il y aura un écoulement d'énergie E vers l'observateur déterminé par la valeur du champ transformé et l'aire de son intersection avec l'observateur. Cette énergie d'interaction peut être rendue aussi petite qu'on le souhaite, en choisissant un observateur suffisamment petit, mais l'énergie n'est jamais nulle. Quand l'observateur mobile s'approche de l'énorme charge massive, l'énergie de l'interaction augmente. Avant que l'observateur n'arrive au point où la force était supposée être supérieure à la force limite, l'énergie de l'interaction aura atteint les limites de l'horizon (111) ou (112) pour l'observateur. Par conséquent, un horizon surgit et l'observateur mobile est empêché d'observer quoi que ce soit, en particulier n'importe quelle valeur que ce soit au-delà de la force de l'horizon.

La même restriction apparaît quand des interactions électriques ou autres sont analysées en utilisant un observateur-test qui est chargé. En résumé, les poussées de Lorentz ne peuvent vaincre la force limite.

* *

L'offensive par la divergence. La force agissant sur une masse m située à une distance
Réf. 82 radiale d d'un trou noir de Schwarzschild (pour $\Lambda = 0$) est donnée par

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

$$F = \frac{GMm}{d^2\sqrt{1-\frac{2GM}{dc^2}}} \,. \tag{120}$$

De plus, la loi en l'inverse du carré de la gravitation universelle déclare que la force agissant entre deux masses m et M est

$$F = \frac{GMm}{d^2} \,. \tag{121}$$

Ces deux expressions peuvent prendre n'importe quelle valeur, ce qui suggère qu'il n'existe aucune force limite maximale.

Une étude méticuleuse montre que la force maximale reste toujours valide. En réalité, la force dans ces deux situations diverge uniquement pour des masses ponctuelles, non physiques. Ainsi, la force maximale implique une distance d'approche minimale, pour une masse m, donnée par

$$d_{\min} = \frac{2Gm}{c^2} \,. \tag{122}$$

La distance minimale d'approche – en termes élémentaires, ceci devrait correspondre au rayon du trou noir associé – interdit d'atteindre une distance nulle entre deux masses ou entre un horizon et une masse. Cela implique qu'une masse ne peut jamais être ponctuelle, et qu'il existe une distance d'approche (réelle) minimale, proportionnelle à la masse. Si ce minimum est inséré dans les équations (120) et (121), nous obtenons

$$F = \frac{c^4}{4G}\,\frac{Mm}{(M+m)^2}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{M}{M+m}}} \leqslant \frac{c^4}{4G} \tag{123}$$

et

$$F = \frac{c^4}{4G}\,\frac{Mm}{(M+m)^2} \leqslant \frac{c^4}{4G}. \tag{124}$$

La valeur de la force maximale n'est donc jamais dépassée tant que nous prenons en compte la taille des observateurs et des objets.

* *

Le problème de cohérence. Si les observateurs ne peuvent être ponctuels, nous devrions nous demander s'il est toujours correct d'appliquer la définition initiale de la variation de la quantité de mouvement ou de la variation de l'énergie comme l'intégrale des valeurs mesurées par des observateurs attachés à une surface donnée. En relativité générale, les observateurs ne peuvent être ponctuels, mais ils peuvent être aussi petits que souhaités. La définition originale reste donc applicable lorsqu'elle est considérée comme étant une procédure limite pour une taille d'observateur qui décroît toujours. Bien évidemment, si la théorie quantique est prise en compte, cette procédure limite touche à sa fin à la longueur de Planck. Ce n'est pas un problème pour la relativité générale, tant que les dimensions caractéristiques de la situation sont beaucoup plus grandes que cette valeur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

La question quantique. Si les effets quantiques sont négligés, il est possible de construire des surfaces ayant des angles pointus ou même des formes fractales qui surpassent la force limite. Toutefois, de telles surfaces ne sont pas physiques, puisqu'elles supposent que des longueurs plus petites que la longueur de Planck peuvent être réalisées ou mesurées. La condition qu'une surface soit physique entraîne qu'il devrait y avoir une incertitude intrinsèque donnée par la longueur de Planck. Une étude détaillée indique que les effets quantiques ne permettent pas à la force de l'horizon d'être dépassée.

Défi 145 pe

Réf. 80

* *

La tentative de l'observateur relativiste extrême. Tout observateur extrême, qu'il soit en mouvement inertiel rapide ou accéléré, n'a aucune chance de devancer la limite. En physique classique, nous sommes habitués à imaginer que l'interaction nécessaire pour réaliser une mesure peut être aussi petite qu'on le veut. Cette affirmation, toutefois, n'est pas valable pour tous les observateurs, en particulier des observateurs extrêmes ne peuvent pas la satisfaire. Pour eux, l'interaction de la mesure est énorme. Ainsi, un horizon se forme et empêche la limite d'être dépassée.

* *

L'essai microscopique. Nous pouvons tenter de dépasser la force limite en accélérant une petite particule aussi fortement que possible ou en la faisant entrer en collision avec d'autres particules. Des forces gigantesques apparaissent en réalité lorsque deux particules de haute énergie sont écrasées l'une contre l'autre. Toutefois, si l'énergie cumulée de ces deux particules devenait assez élevée pour défier la force limite, un horizon apparaîtrait avant qu'elles puissent être suffisamment proches.

En fait, la théorie quantique aboutit exactement à la même conclusion. Elle prévoit déjà en elle-même une limite à l'accélération. Pour une particule de masse m, elle est donnée par

Réf. 89

$$a \leqslant \frac{2mc^3}{\hbar} \,. \tag{125}$$

Ici, $\hbar = 1{,}1 \cdot 10^{-34}$ Js représente le quantum d'action, une constante fondamentale de la nature. En particulier, cette accélération limite est vérifiée dans les accélérateurs de particules, dans les collisions de particules et dans les créations de paires virtuelles. Par exemple, l'apparition spontanée des paires électron–positron dans les champs électromagnétiques intenses ou près des horizons des trous noirs respecte la limite (125). En introduisant la masse maximale possible pour une particule élémentaire, à savoir la masse de Planck (corrigée), nous trouvons alors que l'équation (125) établit que la force de l'horizon est la borne supérieure pour les particules élémentaires.

Page ??

* *

L'offensive par le compactage. Les trous noirs représentent-ils réellement la forme la plus dense de matière ou d'énergie ? L'étude de la thermodynamique des trous noirs montre que des concentrations de masse ayant des densités plus fortes que les trous noirs contrediraient les principes de la thermodynamique. Dans la thermodynamique des trous noirs, la surface et l'entropie sont reliées : des processus réversibles qui réduisent l'entropie

Réf. 82

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pourraient être réalisés si les systèmes physiques pouvaient être comprimés à des valeurs plus petites que le rayon du trou noir. Par conséquent, la taille d'un trou noir est la taille limite pour une masse dans la nature. De manière équivalente, la force limite ne peut pas être dépassée dans la nature.

* *

La tentative d'addition des forces. En relativité restreinte, la composition des vitesses par une simple addition vectorielle n'est pas possible. De manière identique, dans le cas des forces, une telle somme naïve est incorrecte ; ainsi toute tentative pour additionner des forces engendrerait un horizon. Si les manuels de relativité avaient exploré le comportement des vecteurs de force sous l'addition avec le même soin qu'ils l'ont fait avec les vecteurs vitesse, la borne de la force serait apparue beaucoup plus tôt dans la littérature. (Évidemment, la relativité générale est requise pour un traitement rigoureux.)

* *

Pouvez-vous proposer et résoudre une autre tentative pour dépasser la force ou la puissance limite ?

Défi 146 r

Expériences de pensée sur la puissance limite et le flux limite de masse

Comme la borne de la force, la borne de la puissance doit être valide pour tous les systèmes *imaginables*. Nous présentons ici quelques idées pour tenter de la réfuter.

* *

La tentative par le funiculaire. Imaginez un moteur qui accélère un objet à l'aide d'un câble incassable dénué de masse (en supposant qu'un tel câble puisse exister). Au moment où le moteur atteint la barrière de la puissance, celui-ci ou son échappement atteindrait l'équation de l'horizon. Lorsqu'un horizon se forme, le moteur ne peut pas continuer à tirer le câble, puisqu'un câble, même infiniment résistant, ne peut pas traverser un horizon. La limite de la puissance est donc respectée, que le moteur soit installé à l'intérieur du corps en accélération ou à l'extérieur, à l'extrémité du câble qui le tire.

* *

La tentative de la montagne. Il est possible de définir une surface qui serait si étrangement courbée qu'elle passerait *juste au-dessous* des noyaux de chaque atome d'une montagne, comme la surface A indiquée sur la Figure 49. Tous les atomes de la montagne situés au-dessus du niveau de la mer sont alors *juste au-dessus* de la surface, la touchant à peine. En outre, imaginez que cette surface se déplace *vers le haut* presque à la vitesse de la lumière. Il n'est pas difficile de montrer que l'écoulement de masse à travers cette surface est plus élevé que le flux limite de masse. En fait, on attribue au flux limite de masse $c^3/4G$ une valeur d'environ 10^{35} kg/s. En un temps de 10^{-22} s, soit le diamètre d'un noyau divisé par la vitesse de la lumière, 10^{13} kg seulement ont besoin de traverser la surface : c'est la masse d'une montagne.

Cette surface semble fournir un contre-exemple à la limite. Toutefois, une attention minutieuse montre que ce n'est pas le cas. Le problème vient de l'expression « juste au-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

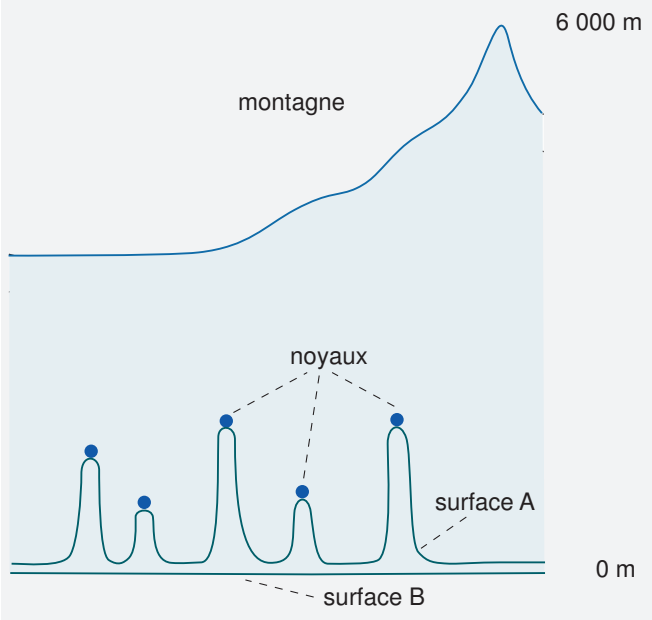


FIGURE 49 La tentative de la montagne pour dépasser la valeur maximale du flux de masse.

dessous ». Les noyaux sont des particules quantiques et possèdent une incertitude quant à leur position ; cette indétermination est essentiellement la distance de noyau à noyau. Par conséquent, afin d'être certain que la surface qui nous intéresse ait bien tous les atomes *au-dessus* d'elle, la forme ne peut pas être celle de la surface A de la Figure 49. Elle doit être plutôt une surface plane qui reste au-dessous de la montagne entière, comme la surface B de la figure. Cependant, une surface plane située sous une montagne ne permet pas de dépasser la variation limite de masse.

* *

L'essai avec de nombreux atomes. Nous pouvons imaginer un nombre d'atomes égal à celui d'une montagne, qui se tiennent tous (approximativement) dans un plan unique et largement espacés les uns des autres. Une nouvelle fois, le plan se déplace vers le haut à la vitesse de la lumière. Mais, même dans ce cas, l'incertitude sur les positions atomiques fait qu'il est impossible d'affirmer que la limite à l'écoulement de la masse a été dépassée.

* *

L'offensive des trous noirs multiples. Les trous noirs sont typiquement énormes, et l'incertitude sur leur position est donc négligeable. La masse limite $c^3/4G$, ou la puissance limite $c^5/4G$, correspond au flux d'un unique trou noir traversant une surface plane à la vitesse de la lumière. Plusieurs trous noirs passant ensemble à travers un plan à une vitesse juste inférieure à celle de la lumière semblent donc vaincre la limite. Toutefois, la surface doit être physique : on doit pouvoir positionner un observateur à chacun de ses points. Mais aucun observateur ne peut traverser un trou noir. Un trou noir perfore donc réellement la surface plane. Personne ne peut affirmer qu'un quelconque trou noir a traversé une surface plane, même sans faire appel à une telle quantité de trous noirs. La

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

limite demeure valide.

* *

La tentative des étoiles à neutrons multiples. Le flux limite de masse semble être atteint lorsque plusieurs étoiles à neutrons (qui sont légèrement moins denses qu'un trou noir de même masse) traversent une surface plane en même temps, à une vitesse élevée. Cependant, quand la vitesse approche celle de la lumière, les temps de traversée pour des points éloignés des étoiles à neutrons et pour ceux qui traversent réellement les étoiles sont très différents. Les étoiles à neutrons qui sont presque à l'état de trou noir ne peuvent pas être traversées de part en part en un temps court selon une horloge de référence qui est située loin des étoiles. À nouveau, la limite n'est pas dépassée.

* *

L'essai par la luminosité. L'existence d'une luminosité maximale a été discutée par les
Réf. 82 astrophysiciens. En toute généralité, la borne maximale sur la puissance, c'est-à-dire sur l'énergie par unité de temps, est valable pour chaque flux d'énergie *traversant n'importe quelle surface physique, quelle qu'elle soit*. Cette surface physique peut même recouvrir l'Univers tout entier. Pourtant, même en rassemblant toutes les chandelles, toutes les étoiles et toutes les galaxies de l'Univers, on ne recouvrira jamais une surface qui aurait une puissance d'émission supérieure à la limite proposée.

La surface doit être *physique**. Une surface est *physique* si un observateur peut être placé sur chacun de ses points. En particulier, une surface physique ne peut pas traverser un horizon, ou avoir une caractéristique locale plus fine qu'une certaine longueur mi-
Page ?? nimale. Cette longueur minimale, qui sera introduite plus tard, est fixée par la longueur de Planck corrigée. Si une surface n'est pas physique, elle peut représenter un contre-
Défi 147 s exemple aux limites de la force et de la puissance. Cependant, ces contradictions ne permettent pas d'affirmer quoi que ce soit concernant la nature. (*Ex falso quodlibet***.)

* *

La tentative des nombreuses sources lumineuses, ou *paradoxe de la puissance*. Une limite absolue pour la puissance impose une limite sur le flux d'énergie qui s'écoule à travers n'importe quelle surface imaginable. À première vue, il peut apparaître que la puissance cumulée émise par deux sources de rayonnement qui émettent chacune 3/4 de la valeur maximale devrait donner une fois et demie cette valeur. Cependant, de telles chandelles cosmiques devraient être si massives qu'elles formeraient un trou noir. Aucune quantité de rayonnement, qui dépasse cette limite, ne peut en sortir. À nouveau, puisque la limite de l'horizon (112) est franchie, un horizon se présente, il absorbe la lumière et empêche la force ou la puissance limite d'être dépassée.

* *

La tentative de la concentration de lumière. Une autre approche consiste à illuminer une masse ronde avec un flash lumineux sphérique, bref et intense. À première vue, il semble

* Elle peut également être qualifiée de *physiquement raisonnable*.

** Nous pouvons déduire n'importe quoi à partir d'une affirmation fausse. (Cette propriété de la logique classique énonce que, si une proposition est à la fois fausse et vraie, alors tout autre énoncé est vrai. [N.D.T.])

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

que les limites de la force et de la puissance puissent être surpassées, parce que l'énergie lumineuse peut être concentrée dans des volumes minuscules. Toutefois, une concentration colossale d'énergie lumineuse forme un trou noir ou incite la masse à en former un. Il n'existe aucune manière de prélever de l'énergie dans une masse à un débit plus rapide que celui dicté par la puissance limite. En réalité, il est impossible de regrouper des sources lumineuses de telle manière que leur émission totale soit supérieure à la puissance limite. Chaque fois que l'on s'approche de la force limite, un horizon se forme et empêche cette limite d'être franchie.

* *

L'offensive par le trou noir. Un système possible dans la nature qui *atteint* réellement la puissance limite est la phase finale de l'évaporation d'un trou noir. Cependant, même dans ce cas, la puissance limite n'est pas dépassée mais seulement égalée.

* *

L'essai par l'écoulement d'eau. Nous pouvons essayer de pomper de l'eau aussi rapidement que possible à travers un grand tube dont l'aire de la section transversale est A. Malgré tout, quand un tube de longueur L rempli avec de l'eau s'écoulant à une vitesse v s'approche de la limite de l'écoulement de masse, la force de gravité exercée par l'eau *attendant* d'être pompée à travers l'aire A fera ralentir l'eau qui est en train d'être pompée à travers cette surface. La limite est une nouvelle fois atteinte lorsque la section A se transforme en un horizon.

Le fait de vérifier qu'aucun système – du microscopique à l'astrophysique – n'excède jamais la puissance maximale ou le flux maximal de masse constitue une épreuve supplémentaire pour la relativité générale. Il peut sembler facile de trouver une contradiction, puisque cette surface peut traverser l'Univers tout entier ou envelopper n'importe quel nombre de réactions entre particules élémentaires. Cependant, tous ces efforts sont vains.

En résumé, dans toutes les situations qui défient la force, la puissance ou le flux de masse limite, à chaque fois que le flux d'énergie atteint la densité de masse–énergie du trou noir dans l'espace ou le flux de l'impulsion correspondante dans le temps, un horizon des événements surgit. Cet horizon fait qu'il est impossible de dépasser les limites. Ces trois limites sont confirmées à la fois par les observations et par la théorie. Des valeurs dépassant ces limites ne peuvent ni être produites ni être mesurées. Les expériences de pensée montrent également que ces trois bornes sont celles qui sont les plus strictes possibles. Évidemment, elles sont ouvertes à des tests ultérieurs et à des expériences de pensée supplémentaires. (Si vous réussissez à en dénicher une excellente, signalez-le à l'auteur.)

Défi 148 r

La vérité se cache

L'absence d'horizons dans la vie quotidienne constitue la *première* raison pour laquelle le principe de la force maximale est resté dissimulé pendant si longtemps. Les expériences dans la vie courante ne peuvent mettre en évidence les limites de la force ou de la puissance. La *deuxième* raison pour laquelle ce principe est demeuré caché, c'est la croyance erronée dans l'existence des particules ponctuelles. C'est une justification théo-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

rique. (Les préjugés contre le concept de force en relativité générale y furent également pour quelque chose.) Le principe de force maximale – et de puissance maximale – est donc resté enfoui durant tant de temps à cause d'une « conspiration » de la nature qui l'a dissimulé à la fois aux yeux des théoriciens et des expérimentateurs.

Afin de comprendre soigneusement la relativité générale, il est essentiel de rappeler que les particules ponctuelles, les masses ponctuelles et les observateurs assimilés à des points n'existent pas. Ils ne sont que des approximations applicables uniquement en physique galiléenne ou en relativité restreinte. En relativité générale, les horizons interdisent leur existence. L'habitude de croire qu'on peut rendre la taille d'un système aussi petite que souhaité, tout en conservant sa masse, empêche de révéler l'existence de la force ou puissance limite.

Une compréhension intuitive de la relativité générale

> « Wir leben zwar alle unter dem gleichen Himmel, aber wir haben nicht alle den gleichen Horizont*. »
>
> Konrad Adenauer

Les idées de force de l'horizon et de puissance de l'horizon peuvent être utilisées comme fondements pour une approche directe et intuitive de la relativité générale.

* *

Qu'est-ce que la gravitation ? Parmi les nombreuses réponses possibles que nous rencontrerons, nous en tenons maintenant une : la gravitation est l'« ombre » de la force maximale. Toutes les fois que nous ressentons faiblement la gravitation, nous pouvons nous rappeler qu'un autre observateur situé au même endroit et au même instant ressentirait la force maximale. Un bon exercice consiste à rechercher les propriétés précises de cet observateur. Une autre manière de le dire : s'il n'y avait pas de force maximale, la gravitation ne pourrait exister.

* *

La force maximale implique l'attraction universelle. Pour le vérifier, nous allons étudier un système planétaire élémentaire, c'est-à-dire doté de vitesses et de forces faibles. Un système planétaire simple de taille L est composé d'un (petit) satellite tournant autour d'une masse centrale M à une distance radiale $R = L/2$. Notons a l'accélération de l'objet. Une vitesse faible implique la condition $aL \ll c^2$, déduite de la relativité restreinte. Une force faible implique $\sqrt{4GMa} \ll c^2$, déduite à partir de la force limite. Ces conditions sont valables pour le système tout entier et pour toutes ses composantes. Ces deux expressions possèdent les dimensions d'une vitesse au carré. Puisque ce système n'a qu'une seule vitesse caractéristique, les deux expressions $aL = 2aR$ et $\sqrt{4GMa}$ doivent être proportionnelles, entraînant

$$a = f\frac{GM}{R^2}\,, \tag{126}$$

* « Nous vivons tous sous le même ciel, mais nous n'avons pas tous le même horizon. » Konrad Adenauer (1876–1967), chancelier d'Allemagne de l'Ouest.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

où le facteur numérique f reste à déterminer. Pour ce faire, nous étudions la vitesse de libération nécessaire pour s'échapper du corps central. Cette vitesse d'échappement doit être plus petite que la vitesse de la lumière pour un corps quelconque plus grand qu'un trou noir. Celle-ci, dérivée à partir de l'expression (126), pour un corps de masse M et de rayon R est donnée par $v_{\text{lib}}^2 = 2fGM/R$. Le rayon minimal R des objets, donné par $R = 2GM/c^2$, implique alors que $f = 1$. Par conséquent, pour des vitesses lentes et des forces faibles, la loi en l'inverse du carré décrit l'orbite d'un satellite autour d'une masse centrale.

* *

Si l'espace-temps vide est flexible, comme une feuille métallique, alors il doit également être capable d'osciller. N'importe quel système physique peut présenter des oscillations lorsqu'une déformation engendre une force de rétablissement. Nous avons vu plus haut qu'il existe une telle force dans le vide : elle est appelée gravitation. En d'autres termes, le vide doit pouvoir osciller et, puisqu'il est étendu, il doit également être capable d'entretenir la propagation d'ondes. En réalité, les ondes gravitationnelles sont prédites par la relativité générale, comme nous le verrons plus loin.

Page 154

* *

Si la courbure et l'énergie sont reliées, la vitesse maximale doit également être valable pour l'énergie gravitationnelle. En fait, nous découvrirons que la gravité possède une vitesse de propagation finie. La loi en l'inverse du carré de la vie quotidienne ne peut pas être exacte, puisqu'elle est incompatible avec une vitesse limite quelconque. Des informations supplémentaires concernant les corrections induites par la vitesse maximale permettront bientôt d'y voir plus clair. De plus, puisque les ondes gravitationnelles sont des ondes d'énergie sans masse, nous nous attendons à ce que la vitesse maximale soit celle de leur propagation. Comme nous le verrons, c'est effectivement le cas.

Page 154

* *

Un corps ne peut pas être plus dense qu'un trou noir (statique) de même masse. Les limites de la force et de la puissance maximales, qui s'appliquent aux horizons, font qu'il est impossible de comprimer une masse en horizons encore plus petits. La limite de la force maximale peut par conséquent être reformulée comme une contrainte sur la taille L des systèmes physiques de masse m :

$$L \geqslant \frac{4Gm}{c^2} \,. \tag{127}$$

Si nous appelons le double du rayon d'un trou noir sa « taille », nous pouvons stipuler qu'aucun système physique de masse m n'est plus petit que cette valeur*. La taille limite joue un rôle crucial en relativité générale. L'inégalité inverse, $m \geqslant \sqrt{A/16\pi}\, c^2/G$, qui définit la « taille » maximale des trous noirs, est appelée l'*inégalité de Penrose* et a été démontrée dans un grand nombre de situations physiquement réalistes. On peut pressentir

Réf. 90, Réf. 91, Réf. 92

* La valeur maximale de la masse pour la taille limite est manifestement similaire à la variation maximale de masse donnée plus haut.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

que cette inégalité de Penrose implique la limite de la force maximale, et vice versa. Le principe de la force maximale, ou la taille minimale équivalente des systèmes constitués de matière–énergie, empêche donc la formation de singularités nues, et implique la validité de ce que nous appelons la *censure cosmique*.

* *

Il y a une puissance limite pour toutes les sources d'énergie. En particulier, la valeur $c^5/4G$ restreint la luminosité de toutes les sources gravitationnelles. En réalité, toutes les formules concernant l'émission d'ondes gravitationnelles impliquent que cette valeur
Réf. 82 est une limite supérieure. En outre, les simulations numériques de la relativité ne l'ont jamais excédée : par exemple, la puissance émise durant la simulation de la fusion de deux trous noirs reste en deçà de cette limite.

* *

Les ondes parfaitement planes n'existent pas dans la nature. Les ondes planes sont infiniment étendues. Mais ni les ondes électromagnétiques ni les ondes gravitationnelles ne peuvent être infinies, puisque de telles ondes transporteraient une quantité de mouvement par unité de temps à travers une surface plane supérieure à celle qui est permise par la limite de la force. La non-existence d'ondes gravitationnelles planes exclut aussi la possibilité d'apparition de singularités lorsque deux ondes de ce type interfèrent.

* *

Dans la nature, il n'existe pas de forces infinies. Il n'y a donc aucune singularité nue naturelle. Les horizons interdisent leur émergence. En particulier, le Big Bang n'était *pas* une singularité. Les théorèmes mathématiques de Penrose et Hawking qui semblent entraîner l'existence de singularités supposent implicitement que les masses ponctuelles existent – souvent sous la forme de « poussières » – contrairement à ce que la relativité générale présuppose. Un réexamen attentif de chacune de ces démonstrations s'impose.

* *

La force limite signifie que l'espace-temps possède une stabilité réduite. Cette limite suggère que l'espace-temps peut être déchiré en morceaux. C'est effectivement le cas. Toutefois, la manière dont cela se produit n'est pas décrite par la relativité générale. Nous l'étudierons dans la dernière partie de ce livre.

* *

La force maximale est l'étalon de la force. Cela implique que la constante gravitationnelle G est constante dans l'espace et le temps – ou, du moins, que ses variations à travers l'espace et le temps ne peuvent pas être détectées. Les données actuelles corroborent
Réf. 93 cette affirmation jusqu'à un haut degré de précision.

* *

Le principe de la force maximale entraîne que l'énergie gravitationnelle – à condition qu'elle puisse être définie – *chute* dans les champs gravitationnels de la même manière que les autres types d'énergie. Ainsi, le principe de la force maximale prévoit que l'effet
Réf. 82 Nordtvedt disparaît. L'effet Nordtvedt est une variation périodique hypothétique dans

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

l'orbite de la Lune qui apparaîtrait si l'énergie gravitationnelle du système Terre–Lune ne diminuait pas, comme d'autres masses–énergies, dans le champ gravitationnel du Soleil. Une large gamme de mesures lunaires a confirmé l'absence de cet effet.

* *

Si les horizons sont des surfaces, nous pouvons nous demander de quelle couleur ils sont.
Page 241 Cette question sera explorée plus tard.

* *

Page ??
Défi 149 e Nous découvrirons plus loin que les effets quantiques ne peuvent pas être mis à contribution pour dépasser la force ou puissance limite. (Pouvez-vous deviner pourquoi ?) La théorie quantique fournit également une limite au mouvement, à savoir une borne inférieure pour l'action. Cependant, cette limite est indépendante de la force ou puissance maximale. (Une analyse dimensionnelle montre déjà cela : il n'existe aucune manière de définir une action par une combinaison de c et G.) Par conséquent, même l'association de la théorie quantique avec la relativité générale n'est d'aucune aide pour surpasser les limites de la force et de la puissance.

Une perception intuitive de la cosmologie

Une puissance maximale constitue l'explication la plus simple possible du paradoxe d'Olbers. La puissance et la luminosité sont deux désignations différentes de la même observable. Le total de toutes les luminosités qui rayonnent dans l'Univers est fini ; la lumière, et toute autre énergie, émise par tous les astres pris collectivement est finie. Si nous supposons que l'Univers est homogène et isotrope, la puissance limite $P \leqslant c^5/4G$ doit rester valide à travers n'importe quel plan qui divise l'Univers en deux parties identiques. La partie de la luminosité de l'Univers qui parvient à la Terre est alors si ténue que le ciel est noir la nuit. En fait, la luminosité réellement mesurée est toujours plus petite que son estimation par le calcul, puisqu'une grande partie de la puissance n'est pas visible pour l'œil humain (étant donné que la majorité de celle-ci est de toute façon constituée de matière). En d'autres termes, la nuit est noire à cause de la puissance limite de la nature. Cette explication *ne* contredit *pas* celle, plus banale, qui fait appel à la durée de vie finie des astres, à leur densité finie, à leur taille finie, ainsi qu'à l'âge limité et à l'expansion de l'Univers. En réalité, la combinaison de tous ces arguments conventionnels implique simplement, et ne fait que répéter en termes plus compliqués, que la puissance limite ne peut pas être dépassée. Pourtant, cette explication plus simple semble être absente de la littérature.

L'existence d'une force maximale dans la nature, de concert avec l'homogénéité et l'isotropie, implique que l'Univers visible est de *taille finie*. Le cas contraire serait un Univers homogène, isotrope et infiniment grand. Mais, dans ce cas, deux moitiés quelconques de l'Univers s'attireraient l'une vers l'autre avec une force supérieure à la limite (pourvu que l'Univers soit assez âgé). Ce résultat peut être quantifié en imaginant une sphère centrée sur la Terre, qui contient tout l'Univers, et dont le rayon décroît avec le temps presque aussi rapidement que la vitesse de la lumière. On conjecture alors que la

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

variation de masse $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t = \rho A v$ atteint le flux limite de masse $c^3/4G$. Nous avons donc

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} = \rho_0 4\pi R_0^2 c = \frac{c^3}{4G} \quad , \tag{128}$$

Réf. 94 une relation également prédite par les modèles de Friedmann. Les mesures de précision du rayonnement cosmologique de fond effectuées par le satellite WMAP confirment que la densité totale d'énergie ρ_0 actuelle (incluant la matière noire et l'énergie sombre) et que le rayon de l'horizon R_0 parviennent quasiment à la valeur limite. La limite de la force maximale prédit donc la taille observée du cosmos.

Une puissance limite finie suggère également que nous pouvons conclure que l'Univers possède un âge fini. Pouvez-vous en trouver un raisonnement ?

Défi 150 s

Défis expérimentaux pour le troisième millénaire

Le manque de tests directs sur la force, la puissance ou le flux de masse de l'horizon est évidemment dû à l'absence d'horizons dans l'environnement de toutes les expériences réalisées jusqu'à présent. Malgré les difficultés pour parvenir aux limites, leurs valeurs sont observables et réfutables.

En réalité, la force limite pourrait être examinée avec des mesures de haute précision dans les pulsars binaires ou les trous noirs binaires. De tels systèmes permettent une détermination précise de la position de chaque astre. Le principe de force maximale implique une relation entre l'incertitude sur la position Δx et l'incertitude sur l'énergie ΔE. Pour tous les systèmes, nous avons

Réf. 80

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} \leqslant \frac{c^4}{4G} \, . \tag{129}$$

Par exemple, une erreur sur la position de 1 mm donne une erreur sur la masse inférieure à $3 \cdot 10^{23}$ kg. Dans la vie quotidienne, toutes les mesures s'accordent avec cette relation. En réalité, le membre de gauche de l'inégalité est tellement petit comparé au membre de droite que nous faisons rarement allusion à cette relation. Pour une vérification directe, seuls les systèmes qui pourraient accomplir l'égalité pure et simple sont intéressants. Les trous noirs doubles ou les pulsars doubles représentent de tels systèmes.

Il se pourrait qu'un jour la quantité de matière chutant dans un trou noir, tel celui situé au centre de la Voie lactée, puisse être mesurée. La borne $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t \leqslant c^3/4G$ pourrait alors être testée directement.

La puissance limite entraîne que les luminosités les plus intenses ne sont atteintes que lorsque des systèmes émettent de l'énergie à la vitesse de la lumière. En réalité, la puissance émise maximale n'est approchée que lorsque toute la matière est diffusée, par rayonnement dans l'espace, le plus rapidement possible : la puissance émise $P = Mc^2/(R/v)$ ne peut pas parvenir à la valeur maximale si le rayon R du corps est supérieur à celui d'un trou noir (le corps le plus dense pour une masse donnée) ou si la vitesse d'émission v est inférieure à celle de la lumière. Les sources ayant les plus fortes luminosités doivent par conséquent être de densité maximale et émettre des entités dépourvues de masse au repos, comme des ondes gravitationnelles, des ondes électroma-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

gnétiques ou (probablement) des gluons. Les prétendants à la détection de ces limites sont les trous noirs en formation, en évaporation ou ceux qui fusionnent.

Le ciel nocturne est une surface candidate qui parvient à la limite. La voûte céleste est un horizon. Étant donné que les flux de lumière, de neutrinos, de particules et d'ondes gravitationnelles se cumulent, on prédit que la limite $c^5/4G$ est atteinte. Si la puissance mesurée est inférieure à la limite (comme il semble que ce soit le cas en ce moment), cela pourrait même fournir un indice sur l'existence de nouvelles particules qui resteraient à découvrir. Si la limite était dépassée ou loin d'être atteinte, la relativité générale apparaîtrait comme étant fausse. Ceci constituerait un test expérimental très intéressant pour l'avenir.

La puissance limite implique qu'une onde dont l'intégrale de l'intensité s'approche de la force limite ne peut pas être plane. La puissance limite entraîne donc une restriction sur le produit de l'intensité I (donnée comme une énergie par unité de temps et unité de surface) par la taille (rayon de courbure) R du front d'une onde se déplaçant à la vitesse de la lumière c :

$$4\pi R^2 I \leqslant \frac{c^5}{4G} \,. \tag{130}$$

De toute évidence, cette affirmation est difficile à vérifier expérimentalement, bien que la fréquence et le type de l'onde puissent l'être, parce que la valeur apparaissant dans le membre de droite est extrêmement grande. Des expériences futures probables avec des détecteurs d'ondes gravitationnelles, des détecteurs de rayons X, de rayons gamma, des récepteurs radio ou des détecteurs de particules pourraient nous permettre de contrôler la relation (130) avec rigueur. (Vous pourriez chercher à prédire laquelle de ces expé-
Défi 151 e riences confirmera la première cette limite.)

Le manque de tests expérimentaux directs sur les limites de la force et de la puissance explique pourquoi les *tests indirects* sont particulièrement importants. Tous ces tests étudient le mouvement de la matière ou de l'énergie et le comparent avec une célèbre conséquence de la force et de la puissance limites : les équations du champ de la relativité générale. Ce sera notre prochain domaine d'exploration.

Un résumé de la relativité générale

Il existe une formulation axiomatique élémentaire de la relativité générale : la force de l'horizon $c^4/4G$ et la puissance de l'horizon $c^5/4G$ sont les plus fortes valeurs possibles pour la force et la puissance. Nous ne connaissons aucune observation qui contredise cela. Il n'a été imaginé aucun contre-exemple. La relativité générale découle de ces limites. Par ailleurs, ces limites expliquent l'obscurité de la nuit et la finitude de la taille de l'Univers.

Le principe de la force maximale possède des applications évidentes dans l'enseignement de la relativité générale. Ce principe met celle-ci à la portée des étudiants du premier niveau universitaire, et probablement aux élèves bien préparés du second cycle : seuls les concepts de force maximale et d'horizon sont nécessaires. La courbure de l'espace-temps est une conséquence de la courbure de l'horizon.

Le concept d'une force maximale met le doigt sur un autre aspect de la gravitation. La constante cosmologique Λ n'est pas fixée par le principe de la force maximale. (Tou-
Défi 152 pe tefois, ce principe lui attribue un signe positif.) Des mesures récentes donnent le résultat

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Page 221 $\Lambda \approx 10^{-52}\,/\mathrm{m}^2$. Une constante cosmologique positive entraîne l'existence d'une densité d'énergie négative $-\Lambda c^4/G$. Cette valeur correspond à une pression négative, puisque la pression et la densité d'énergie possèdent les mêmes dimensions. La multiplication
Page ?? par l'aire de Planck (numériquement corrigée) $2G\hbar/c^3$, la plus petite aire dans la nature, redonne une valeur pour la force de :

$$F = 2\Lambda\hbar c = 0{,}60 \cdot 10^{-77}\,\mathrm{N}\,. \tag{131}$$

Elle représente également la force gravitationnelle qui agit entre deux masses de Planck (numériquement corrigées) $\sqrt{\hbar c/8G}$ situées à la distance cosmologique $1/4\sqrt{\Lambda}$. Si nous formulons l'hypothèse, quelque peu séduisante, que l'expression (131) est la plus petite force possible dans la nature (les facteurs numériques ne sont pas encore vérifiés), nous obtenons la conjecture fascinante que la théorie complète de la relativité générale, incluant la constante cosmologique, peut être définie par la combinaison d'une force *maxi-*
Défi 153 d *male* et d'une *minimale* dans la nature. (Pouvez-vous découvrir une force plus petite ?)

Il est plus compliqué de démontrer la conjecture de la force minimale que celle de la force maximale. Jusqu'à présent, seules certaines présomptions peuvent être formulées. Comme la force maximale, la force minimale doit être compatible avec la gravitation, ne doit pas être mise en défaut par une quelconque expérience, et doit résister à toute expérience de pensée. Un examen rapide montre que cette force minimale, comme nous venons de le souligner, nous permet de déduire la gravitation, est un invariant, et n'est réfutée par aucune expérience. Il y a également un faisceau d'indices qui laisse présager qu'il n'existe probablement aucune manière d'engendrer ou de mesurer une valeur plus petite. Par exemple, la force minimale correspond à l'énergie par unité de longueur contenue dans un photon ayant une longueur d'onde de la taille de l'Univers. Il est ardu – mais peut-être pas impossible – d'imaginer la formation d'une force encore plus petite.

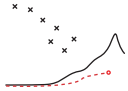
Nous avons vu que le principe de la force maximale et la relativité générale ne parviennent pas à fixer la valeur de la constante cosmologique. Seule une théorie unifiée peut le faire. Nous avons donc deux prérequis pour une telle théorie. Premièrement, toute théorie unifiée doit prédire la même borne supérieure pour la force. Deuxièmement, une théorie unifiée doit déterminer la constante cosmologique. L'apparition de $\hbar$ dans l'expression conjecturée pour la force minimale suggère que celle-ci est établie par une combinaison de la relativité générale et de la théorie quantique. La démonstration de cette hypothèse et la mesure directe de la force minimale constituent deux défis majeurs pour notre ascension au-delà de la relativité générale.

Nous sommes dorénavant prêts à explorer les conséquences de la relativité générale et ses équations du champ plus en détail. Nous allons commencer en nous concentrant sur le concept de courbure de l'espace-temps dans la vie quotidienne, et en particulier sur ses conséquences pour l'observation du mouvement.

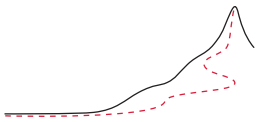
Remerciements

L'auteur remercie Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier et Peter Brown pour leurs discussions passionnantes sur ces sujets.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 3

LES IDÉES NOUVELLES SUR L'ESPACE, LE TEMPS ET LA GRAVITÉ

« Sapere aude. »

Horace*

Les attractions gravitationnelles transportent de l'énergie**. Notre description du mouvement doit par conséquent être assez précise pour supposer que ce transport puisse se produire tout au plus à la vitesse de la lumière. Henri Poincaré avait déjà exprimé cette condition dès 1905. Les implications qui découlent de ce principe sont palpitantes : nous découvrirons que l'espace vide peut se déplacer, que l'Univers possède un âge fini et que des objets peuvent être perpétuellement en chute libre. Il en ressortira que l'espace vide peut être courbé, bien qu'il soit beaucoup moins flexible que l'acier. Malgré ces étranges conséquences, la théorie et toutes ses prédictions ont été confirmées par toutes les expériences.

La théorie de la gravitation universelle, qui décrit le mouvement engendré par la gravité en utilisant la relation $a = GM/r^2$, autorise des vitesses supérieures à celle de la lumière. En réalité, la vitesse d'une masse en orbite n'est pas limitée. La manière dont les valeurs de a et de r dépendent de l'observateur est également vague. Donc cette théorie ne peut pas être exacte. Afin de parvenir à la description correcte, dénommée *relativité générale* par Albert Einstein, nous devons jeter par-dessus bord un certain nombre d'idées préconçues.

Réf. 95, Réf. 96

Repos et chute libre

L'antithèse du mouvement dans la vie quotidienne est matérialisée par un corps au repos, comme un enfant qui dort ou un rocher qui résiste aux vagues. Un corps est dit au repos à chaque fois qu'il n'est pas perturbé par d'autres corps. Dans la description galiléenne du monde, le repos est l'*absence de vitesse*. En relativité restreinte, le repos devient le *mouvement inertiel*, puisque aucun observateur en mouvement inertiel ne peut faire la distinction entre son propre mouvement et le repos : rien ne le perturbe. Le rocher dans les vagues et les protons qui traversent promptement la galaxie, comme les rayons cosmiques, sont tous au repos. L'intrusion de la gravité nous emmène tout droit vers une définition encore plus générale.

Défi 154 e

Si tout corps en mouvement inertiel doit être considéré comme étant au repos, alors

* « Ose être sage. » Quintus Horatius Flaccus, *Épîtres*, 1, 2, 40.

** Les particularités de cette affirmation sont loin d'être évidentes. Elles sont discutées à la page 154 et à la page 190.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tout corps en chute libre doit également l'être. Joseph Kittinger le sait mieux que quiconque, lui qui, en août 1960, sauta de la capsule d'un ballon à une hauteur record de
Réf. 97 31,3 km. À cette altitude, l'air est si raréfié que, pendant la première minute de sa chute libre, il se sentit complètement au repos, comme s'il était en train de flotter. Bien qu'étant parachutiste expérimenté, il fut si étonné qu'il dut se tourner vers le haut afin de se convaincre qu'il était vraiment en train de s'éloigner de son ballon ! Malgré son manque flagrant de sensation de mouvement, il était en train de chuter à 274 m/s ou 988 km/h en direction de la surface de la Terre. Il ne commença à ressentir quelque chose que lorsqu'il rencontra les premières couches d'air substantielles, ce qui se produisit lorsque sa chute libre commença à être perturbée. Ensuite, après quatre minutes et demie de descente, son parachute spécial s'ouvrit, et neuf minutes plus tard il atterrissait au Nouveau-Mexique.

Kittinger et tous les autres observateurs en chute libre, comme les cosmonautes qui gravitent autour de la Terre ou les passagers des vols aériens paraboliques*, font la même observation : il est impossible de distinguer quoi que ce soit survenant en chute libre de ce qui surviendrait au repos. Cette impossibilité est appelée le *principe d'équivalence*, c'est l'un des points de départ de la relativité générale. Elle conduit à la définition la plus précise, et la dernière : *le repos est la chute libre*. Le repos est l'absence de perturbation, donc il est la chute libre.

L'ensemble de tous les observateurs chutant librement en un point de l'espace-temps généralise la notion relativiste (restreinte) d'ensemble des observateurs inertiels ponctuels. Cela signifie que nous devons décrire le mouvement de telle manière que non seulement les observateurs inertiels mais également ceux chutant librement puissent se comprendre. De plus, une description complète du mouvement doit être apte à décrire la gravitation et le mouvement qu'elle engendre, et doit être capable de décrire le mouvement pour n'importe quel observateur concevable. La relativité générale y parvient.

En premier lieu, nous exprimons ce résultat en termes simples : le *véritable mouvement est le contraire de la chute libre*. Ce postulat soulève immédiatement de nombreuses questions : la plupart des arbres ou des montagnes ne sont pas en chute libre, donc ils
Défi 155 s ne sont pas au repos. Quel mouvement effectuent-ils ? Et si la chute libre est du repos, qu'est-ce que le poids ? Et, en fin de compte, que représente la gravité ? Commençons par la dernière question.

Qu'est-ce que la gravité ? – Une deuxième réponse

Au début, nous avons décrit la gravité comme étant l'ombre de la force maximale. Mais il existe une deuxième façon de la décrire, plus proche de la vie courante. Comme
Réf. 98 William Unruh aime l'expliquer, la constance de la vitesse de la lumière pour tous les observateurs implique une conclusion élémentaire : *la gravité est l'avancement inégal d'horloges situées en des endroits différents***. Bien sûr, cette définition apparemment ab-
Défi 157 e surde a besoin d'être vérifiée. Celle-ci ne dit rien concernant une unique situation perçue par des observateurs distincts, comme nous le faisions fréquemment en relativité

* Actuellement, il est possible de réserver de tels vols dans les agences de voyages spécialisées.

** La gravité est aussi la longueur inégale de mètres étalons situés en des endroits différents, comme nous le verrons plus bas. Ces deux effets sont nécessaires pour la décrire de manière complète, mais dans la vie courante sur Terre l'effet des horloges est suffisant, puisqu'il est beaucoup plus significatif que l'effet des
Défi 156 s longueurs, lequel peut généralement être ignoré. Pouvez-vous voir pourquoi ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

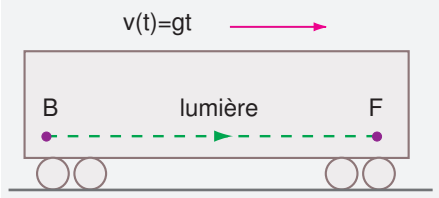


FIGURE 50 À l'intérieur d'un train ou d'un bus en accélération.

restreinte. Cette définition dépend du fait que des horloges adjacentes identiques, fixées l'une contre l'autre, avancent différemment en présence d'un champ gravitationnel lorsqu'elles sont regardées par le *même* observateur. Par ailleurs, cette différence est directement reliée à ce que nous appelons généralement la gravité. Il existe deux manières de vérifier ce rapport : par l'expérience et par le raisonnement. Commençons avec la dernière méthode, puisqu'elle est plus économique, plus rapide et plus amusante.

Un observateur ne ressent aucune différence entre la gravité et une accélération constante. Nous pouvons donc étudier l'accélération constante et employer une manière de réfléchir que nous avons déjà rencontrée dans le chapitre sur la relativité restreinte. Supposons que de la lumière soit émise à l'extrémité arrière d'un train de longueur Δh qui est accéléré vers l'avant avec une accélération g, comme indiqué sur la Figure 50. La lumière arrive à l'avant après une durée $t = \Delta h/c$. Toutefois, pendant ce temps, le train en accélération a gagné une certaine vitesse supplémentaire, à savoir $\Delta v = gt = g\Delta h/c$. Par conséquent, à cause de l'effet Doppler que nous avons rencontré dans notre discussion sur la relativité restreinte, la fréquence f de la lumière parvenant à l'avant est modifiée. En utilisant l'expression de l'effet Doppler, nous avons alors*

Page 50
Défi 158 e

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{g\Delta h}{c^2} \,. \tag{132}$$

Le signe de la variation de fréquence dépend du fait que le mouvement de la lumière et l'accélération du train se font dans la même direction ou dans des directions opposées. Pour des trains ou des bus réels, la variation de fréquence est très petite, mais reste mesurable. L'accélération induit des variations de fréquence pour la lumière. Comparons cet effet de l'accélération avec les effets de la gravité.

Défi 160 s

Pour mesurer l'espace et le temps, nous nous servons de la lumière. Qu'est-ce qui se passe pour la lumière quand la gravité entre en jeu ? L'expérience la plus simple consiste à laisser la lumière tomber ou s'élever. Afin de déduire ce qui devrait se produire, nous ajoutons quelques précisions. Imaginez un tapis roulant transportant des masses autour de deux roues, une en bas et une en haut, comme le montre la Figure 51. Les masses vertes qui descendent sont légèrement plus grosses. À chaque fois qu'une telle masse plus importante s'approche du bas, un certain dispositif – non montré sur la figure – transforme l'excédent de masse en lumière, en accord avec l'équation $E = mc^2$, et envoie cette lumière vers le niveau supérieur**. Au sommet, une des masses blanches plus

Réf. 99

* L'expression $v = gt$ est uniquement valable pour des vitesses non relativistes, cependant, la conclusion de cette section n'est pas affectée par cette approximation.

Défi 159 e

** Comme en relativité restreinte, ici et dans le reste de notre ascension montagneuse, le terme « masse » se

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

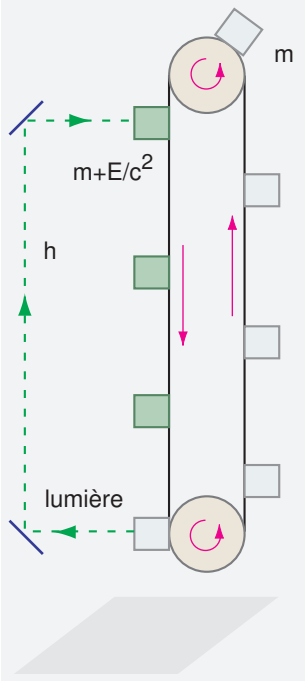


FIGURE 51 La contrainte du décalage vers le rouge et le bleu de la lumière : pourquoi les arbres sont plus verts au pied.

légères passe à proximité, absorbe la lumière et, à cause de sa masse additionnelle, fait tourner le tapis roulant jusqu'à ce qu'elle parvienne en bas. Le même processus se répète alors*.

Puisque les masses vertes sur le flanc descendant sont toujours plus lourdes, le tapis tournerait perpétuellement et ce système pourrait *produire* continuellement de l'énergie. Néanmoins, puisque la conservation de l'énergie est le fondement même de notre définition du temps, comme nous l'avons vu au début de notre promenade, le processus dans sa globalité doit être inconcevable. Nous devons conclure que la lumière voit son énergie modifiée lorsqu'elle monte. La seule possibilité est que celle-ci parvient au sommet avec une fréquence *différente* de celle à laquelle elle a été émise en bas**.

Page 200

En bref, il apparaît que la lumière montante est gravitationnellement décalée vers le rouge. De manière similaire, la lumière qui descend de la cime d'un arbre vers un observateur situé plus bas est *décalée vers le bleu*, ce qui donne une couleur plus sombre au sommet par rapport au pied de l'arbre. La relativité générale affirme donc que les arbres possèdent différentes nuances de vert le long de leur hauteur***. Quelle est l'importance de cet effet ? Le résultat déduit à partir du schéma est une nouvelle fois celui de la formule (132). C'est ce que nous cherchions, puisque la lumière se déplaçant dans un train en accélération et la lumière avançant sous l'effet de la gravité sont des situations

Défi 163 e

réfère toujours à la masse inertielle.

Défi 161 s

* Ce processus peut-il être réalisé avec 100 % d'efficacité ?

** La relation précise entre l'énergie et la fréquence de la lumière est décrite et expliquée dans notre discussion de la théorie quantique, à la page ??. Mais nous savons déjà grâce à l'électrodynamique classique que l'énergie de la lumière dépend de son intensité et de sa fréquence.

Défi 162 pe

*** Quel est l'impact sur cet argument si vous prenez en compte l'illumination due au Soleil ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 164 s équivalentes, comme vous devriez pouvoir le vérifier vous-même. Cette formule donne une variation relative de fréquence de $1{,}1 \cdot 10^{-16}$ /m seulement, à proximité de la surface de la Terre. Pour les arbres, ce que nous appelons le *décalage vers le rouge gravitationnel* ou *effet Doppler gravitationnel* est beaucoup trop insignifiant pour être observable, tout au moins en faisant appel à la lumière ordinaire.

Réf. 100 En 1911, Einstein proposa une expérience pour vérifier la variation de fréquence avec la hauteur par la mesure du décalage vers le rouge de la lumière émise par le Soleil, en Page ?? utilisant les fameuses raies de Fraunhofer* comme marqueurs de couleur. Les résultats des premières expériences, réalisées par Schwarzschild et d'autres, étaient imprécis, voire négatifs, à cause d'un grand nombre d'effets additionnels qui induisent des variations de couleur à haute température. Mais, en 1920 et 1921, Grebe et Bachem, et de manière indépendante Perot, confirmèrent le décalage vers le rouge gravitationnel à l'aide d'expériences méticuleuses. Dans les années qui suivirent, les avancées technologiques facilitèrent la réalisation des mesures, jusqu'à ce qu'il fût même possible de mesurer cet effet sur Terre. En 1960, dans une expérience exemplaire utilisant l'effet Mössbauer, Pound et Rebka validèrent le décalage vers le rouge gravitationnel dans la tour de leur université Réf. 101 en utilisant des rayons γ.

Mais nos deux expériences de pensée nous en disent beaucoup plus. Utilisons les mêmes arguments que dans le cas de la relativité restreinte : une variation de couleur implique que des horloges avancent différemment à des hauteurs différentes, de la même manière qu'elles avancent différemment à l'avant et à l'arrière du train. On prédit que la différence temporelle $\Delta\tau$ dépend de la différence de hauteur Δh et de l'accélération de la gravité g comme suit

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{g\Delta h}{c^2} \,. \tag{133}$$

Par conséquent, sous l'effet de la gravité, *le temps dépend de la hauteur*. C'est exactement ce que nous avions affirmé plus haut. En réalité, *la hauteur fait vieillir*. Pouvez-vous confir-Défi 165 pe mer cette conclusion ?

En 1972, en embarquant quatre horloges très précises dans un avion tout en en gardant Réf. 102 une identique au sol, Hafele et Keating relevèrent que les horloges avançaient réellement différemment à des altitudes distinctes en accord avec l'expression (133). Par la suite, en Réf. 103 1976, l'équipe de Vessot *et al.* propulsa dans l'atmosphère une horloge ultra-précise basée sur un maser – un générateur et oscillateur micro-onde précis – et située sur un missile. L'équipe compara le maser à l'intérieur du projectile avec un maser identique cloué au Réf. 104 sol, confirmant de nouveau cette expression. En 1977, Briatore et Leschiutta montrèrent qu'une horloge située à Turin égrène ses tic-tac plus lentement qu'une autre située au sommet du mont Rose. Ils confirmèrent la prédiction que sur Terre, pour chaque hauteur Défi 166 pe parcourue de 100 m, les gens vieillissent plus rapidement d'environ 1 ns par jour. Cet effet a été confirmé pour tous les systèmes pour lesquels des expériences ont été réalisées, tels que diverses planètes, le Soleil et de nombreuses autres étoiles.

Ces expériences montrent-elles que le temps varie ou sont-elles tout simplement dues à des horloges qui fonctionnent mal ? Prenez un peu de temps et essayez de répondre à Défi 167 e cette question. Nous ne donnerons qu'un seul argument : la gravité change la couleur de

* Plus communément appelées raies d'absorption solaire [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

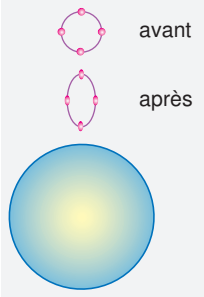


FIGURE 52 Forces de marée : le seul effet que des corps ressentent en chutant.

la lumière, et donc agit effectivement sur le temps. La précision des horloges n'est pas un problème, ici.

En résumé, la gravité est vraiment l'avancement inégal d'horloges situées à des altitudes différentes. Remarquez qu'un observateur en position basse et un autre en position haute *s'accordent* sur ce résultat : tous les deux remarqueront que l'horloge supérieure avance plus vite. En d'autres termes, lorsque la gravité est présente, l'espace-temps n'est *pas* décrit par la géométrie de Minkowski de la relativité restreinte, mais par une géométrie encore plus générale. Pour l'exprimer de manière mathématique, à chaque fois que la gravité entre en jeu, la quadri-distance ds^2 entre des événements est différente de l'expression qui ne tient pas compte de la gravité :

$$ds^2 \neq c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \,. \tag{134}$$

Nous allons donner sous peu l'expression exacte.

Cette vision de la gravité comme un temps dépendant de la hauteur est-elle sérieusement raisonnable ? Non. Il apparaît qu'elle est encore plus étrange que cela ! Puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, nous pouvons en dire plus. Si le temps varie avec la hauteur, la longueur doit également en faire autant ! Plus précisément, si des horloges avancent différemment à des hauteurs différentes, la longueur de mètres étalons doit aussi varier avec la hauteur. Pouvez-vous le confirmer pour le cas de barres horizontales situées à des altitudes distinctes ?

Défi 168 pe

Si la longueur varie avec la hauteur, la circonférence d'un cercle entourant la Terre *ne peut pas* être donnée par $2\pi r$. Un désaccord analogue est également relevé par une fourmi qui mesure le rayon et la circonférence d'un cercle tracé sur la surface d'un ballon de basket. En réalité, la gravité implique que les êtres humains sont dans une situation semblable à celle des fourmis sur un ballon de basket, l'unique différence étant que les circonstances se manifestent en deux et en trois dimensions. Nous en concluons que partout où la gravité joue un rôle, l'espace est *courbé*.

CE QUE LES MARÉES NOUS ENSEIGNENT À PROPOS DE LA GRAVITÉ

Durant sa chute libre, Kittinger était capable de définir un référentiel inertiel pour lui-même. En fait, il se sentait complètement au repos. Cela signifie-t-il qu'il est impossible de distinguer l'accélération de la gravitation ? Non : la distinction *est* possible. Nous avons juste besoin de comparer *deux* observateurs (ou plus) qui chutent.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Kittinger n'aurait pas pu trouver un référentiel qui soit également inertiel pour un confrère chutant du côté opposé de la Terre. Un tel référentiel commun n'existe pas. En général, il est impossible de découvrir un *unique* référentiel inertiel décrivant des observateurs distincts chutant librement près d'une masse. En fait, il est même impossible de trouver un référentiel inertiel commun pour des observateurs *proches* plongés dans un champ gravitationnel. Deux observateurs proches remarquent que, pendant leur chute, leur distance relative varie. (Pourquoi ?) La même chose se produit pour des observateurs en orbite.

Défi 169 e

Défi 170 s

Dans une pièce close en orbite autour de la Terre, une personne ou une masse située au centre de la pièce ne ressentirait aucune force, et en particulier aucune force de pesanteur. Mais, si plusieurs particules sont placées dans cette pièce, elles se comporteront différemment en fonction de leur position exacte dans la pièce. Deux particules ne conserveraient la même position relative que si elles étaient exactement sur la même orbite. Si une particule est située sur une orbite plus haute ou plus basse que l'autre, elles s'écarteront l'une de l'autre au cours du temps. De façon encore plus intéressante, si une particule en orbite est poussée latéralement, elle oscillera autour d'une position centrale. (Pouvez-vous entériner ce point ?)

Défi 171 pe

La gravitation conduit à des variations relatives de distance. Ces changements témoignent d'un autre effet, indiqué dans la Figure 52 : un corps étendu en chute libre est légèrement *comprimé*. Cet effet nous enseigne aussi qu'une caractéristique essentielle de la gravité est que la chute libre est *différente* d'un point à un autre. Cela nous rappelle quelque chose. La compression d'un corps est le même effet que celui qui engendre les marées. En réalité, le renflement des océans peut être vu comme étant la compression de la Terre dans sa chute vers la Lune. En utilisant ce résultat de la gravitation universelle, nous pouvons maintenant confirmer : l'essence de la gravité est acquise par l'observation des forces de marée.

Page 136

Réf. 105

Formulé autrement, la gravité n'est simple que *localement*. Ce n'est que localement qu'elle ressemble à l'accélération. Ce n'est que localement qu'un observateur qui tombe comme Kittinger se sentira au repos. En fait, seul un observateur assimilé à un point peut le faire ! Dès que nous prenons en considération l'extension spatiale, nous rencontrons les forces de marée. *La gravité est la présence d'effets de marée*. L'absence de forces de marée implique l'absence de gravité. Elles représentent la conséquence quotidienne du temps dépendant de la hauteur. N'est-ce pas un merveilleux dénouement ?

En principe, Kittinger aurait pu *ressentir* la gravitation durant sa chute libre, même en fermant les yeux, s'il avait prêté plus attention à lui-même. S'il avait mesuré la variation de distance entre ses deux mains, il aurait remarqué une minuscule diminution qui aurait pu lui faire dire qu'il était en train de tomber. Cette fine diminution aurait imposé à Kittinger une étrange conclusion. Deux mains en mouvement inertiel devraient se déplacer le long de deux lignes parallèles, conservant constamment la même distance. Puisque la distance varie, il doit conclure que dans l'espace qui l'environne des lignes qui commencent en étant parallèles ne le restent pas. Kittinger aurait pu conclure que l'espace autour de lui était analogue à la surface de la Terre, où deux lignes qui démarrent au nord, parallèles l'une à l'autre, ont également un écartement qui varie, jusqu'à ce qu'elles se rencontrent au pôle Nord. En d'autres termes, Kittinger aurait pu conclure qu'il était dans un *espace courbe*.

En étudiant la variation de distance entre ses mains, Kittinger aurait même pu en

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

déduire que la courbure de l'espace varie avec la hauteur. L'espace physique est différent d'une sphère, où la courbure est constante. L'espace physique est plus complexe. Cet effet est extrêmement faible, et ne peut pas être perçu par les facultés sensorielles humaines. Kittinger n'avait aucune chance de déceler quoi que ce soit. La détection requiert des appareils ultrasensibles spécifiques. Néanmoins, cette conclusion reste valable. L'espace-temps n'est *pas* décrit par la géométrie de Minkowski quand la gravité est présente. Les forces de marée impliquent la courbure de l'espace-temps. La gravité est la courbure de l'espace-temps.

Espace courbe et matelas

> « Wenn ein Käfer über die Oberfläche einer Kugel krabbelt, merkt er wahrscheinlich nicht, daß der Weg, den er zurücklegt, gekrümmt ist. Ich dagegen hatte das Glück, es zu merken*. »
>
> Réponse d'Albert Einstein à la question de son fils Édouard sur la raison de sa renommée.

Le 7 novembre 1919, Albert Einstein devint mondialement célèbre. Ce jour-là, un article paru dans le quotidien *Times* de Londres annonçait les résultats d'une double expédition partie vers l'Amérique du Sud, sous le titre « Révolution en sciences – Une nouvelle théorie de l'Univers – Les conceptions newtoniennes sont détrônées ». Cette expédition avait démontré sans équivoque – bien que ce ne fût pas la première fois – que la théorie de la gravitation universelle, essentiellement donnée par $a = GM/r^2$, était fausse, et qu'à la place l'espace était *courbé*. Un élan enthousiaste s'empara du monde entier. Einstein fut présenté comme étant le plus grand de tous les génies. La plupart des journaux titraient « L'espace est déformé ». Les articles d'Einstein sur la relativité générale furent réimprimés en entier dans des revues populaires. Les gens pouvaient lire les équations du champ de la relativité générale, sous forme tensorielle et avec les indices en lettres grecques, dans la revue *Time*. Rien de comparable à cela ne s'était produit auparavant ni ne s'est produit depuis pour n'importe quel autre physicien. Quelle était la raison de cette effervescence ?

L'expédition partie dans l'hémisphère Sud avait effectué une expérience proposée par
Réf. 106
Einstein lui-même. Mis à part la vérification de la variation du temps avec l'altitude, Einstein avait également songé à un grand nombre d'expériences supplémentaires pour détecter la courbure de l'espace. Dans celle qui l'a rendu célèbre par la suite, Einstein suggérait de prendre une photographie des étoiles proches du Soleil, si possible pendant une éclipse solaire, et de la comparer à une photographie des mêmes étoiles, la nuit, lorsque le Soleil est très éloigné. Einstein avait prédit une variation dans la position de $1,75''$ (1,75 seconde d'arc) pour des photos d'étoiles situées en bordure du Soleil, une valeur *deux*
Page 139
fois plus grande que celle prédite par la gravitation universelle. Ce pronostic, correspondant à une distance de 1/40 mm sur les photographies, fut confirmé en 1919, et ainsi la gravitation universelle fut anéantie.

Ce résultat *implique*-t-il que l'espace est courbé ? En lui-même, non. En fait, d'autres explications pourraient être données pour le résultat de l'expérience de l'éclipse, comme

* « Lorsqu'un insecte marche sur la surface d'une sphère, il ne remarque probablement pas que le chemin qu'il emprunte est courbé. Moi, par contre, j'ai eu la chance de le remarquer. »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

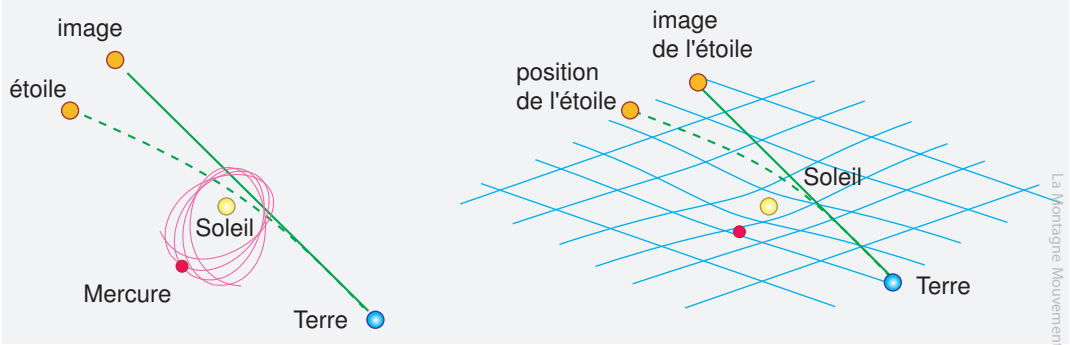


FIGURE 53 Le modèle de l'espace sous forme de matelas : la trajectoire d'un rayon lumineux et d'une planète près d'une masse sphérique.

par exemple un potentiel différent de la forme en l'inverse du carré. Toutefois, les résultats de l'éclipse ne constituent pas les seules données. Nous savons déjà que le temps varie en fonction de la hauteur. Des expériences montrent que deux observateurs placés à des altitudes distinctes mesurent la même valeur pour la vitesse de la lumière c à leur proximité. Mais ces expériences montrent aussi que, si un observateur mesure la vitesse de la lumière à la position de l'*autre* observateur, il obtient une valeur différente de c, puisque son horloge avance différemment. Il n'y a qu'une solution possible à ce dilemme : les mètres étalons, comme les horloges, varient également avec la hauteur, et d'une façon telle qu'ils doivent produire partout la même vitesse pour la lumière.

Si la vitesse de la lumière est constante mais que les horloges et les mètres étalons varient avec l'altitude, la conclusion doit être que *l'espace est courbé à proximité des masses*. De nombreux physiciens au cours du vingtième siècle s'assurèrent que les mètres étalons sont vraiment différents là où la gravité est présente. Et en réalité la courbure a été décelée autour de plusieurs planètes, dans le voisinage de toutes les centaines d'étoiles où elle pouvait être mesurée, et autour de douzaines de galaxies. Beaucoup d'effets indirects de la courbure autour des masses, qui seront analysés en détail ci-dessous, ont également été observés. Tous les résultats confirment la courbure de l'espace et de l'espace-temps autour des masses, et valident de surcroît les valeurs de courbure prédites par la relativité générale. En d'autres termes, les mètres étalons situés à proximité des masses voient réellement leur taille varier d'un endroit à l'autre, et même d'une orientation à l'autre. La Figure 53 donne une idée de cette situation.

Défi 172 pe

Mais attention : la figure de droite, même si on la rencontre dans de nombreux manuels, peut induire en erreur. Elle peut facilement être confondue avec une reproduction d'un *potentiel* autour d'un corps. En réalité, il est impossible de dessiner un graphique représentant la courbure et le potentiel séparément. (Pourquoi ?) Nous verrons que pour des courbures faibles il est même possible d'expliquer la variation de la longueur du mètre étalon en utilisant seulement un potentiel. Cette figure ne triche donc pas réellement, au moins dans le cas d'une faible gravité. Mais pour des valeurs énormes et variables de la gravité, on ne peut pas définir de potentiel, et il n'existe donc en fait aucune manière de ne pas utiliser l'espace courbe pour décrire la gravitation. En résumé, si nous imaginons l'espace comme une sorte de matelas généralisé dans lequel des masses produisent des déformations, nous avons un modèle plausible de l'espace-temps. Puisque

Réf. 107

Défi 173 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

les masses bougent, les déformations les suivent.

L'accélération d'une particule ne dépend que de la courbure du matelas. Elle ne dépend pas de sa masse. Donc le modèle du matelas explique pourquoi tous les corps tombent de la même manière. (Autrefois, on appelait également cela l'égalité entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle.)

L'espace se comporte donc comme un matelas lisse qui s'infiltre partout. Nous vivons à l'intérieur du matelas, mais nous ne le ressentons pas dans la vie courante. Les objets massifs tirent la mousse du matelas vers eux, modifiant ainsi la forme de ce dernier. Une force, une énergie ou une masse plus importante entraîne une déformation plus importante. (Le matelas vous fait-il penser à l'éther ? Ne vous inquiétez pas : la physique a
Page 108 évincé le concept d'éther parce qu'il est indiscernable du vide.)

Si la gravité signifie que l'espace est courbé, alors n'importe quel observateur accéléré, comme un homme dans une voiture qui démarre, doit aussi le constater. Toutefois, dans la vie quotidienne, nous n'observons pas de tels effets, parce que pour les accélérations et les dimensions de la vie courante les valeurs de courbure sont trop insignifiantes pour être perçues. Pouvez-vous concevoir une expérience, faisant appel à nos sens, qui vérifie
Défi 174 pe cette prédiction ?

Espace-temps courbe

La Figure 53 montre la courbure de l'espace uniquement, mais en fait c'est l'espace-temps qui est courbé. Nous découvrirons bientôt comment décrire à la fois la forme de l'espace et la forme de l'espace-temps, et comment mesurer leur courbure.

Faisons une première tentative pour décrire la nature avec l'idée d'espace-temps courbe. Dans le cas de la Figure 53, la meilleure description des événements est faite par l'emploi du temps t indiqué par une horloge située à l'infini dans l'espace. Cela contourne les problèmes dus à l'avancement inégal d'horloges situées à des distances différentes de la masse centrale. Pour la coordonnée radiale r, le choix le plus commode pour éviter des problèmes avec la courbure de l'espace consiste à utiliser la circonférence d'un cercle situé autour du corps central, divisé par 2π. La forme courbe de l'espace-temps est mieux décrite par le comportement de la distance de l'espace-temps ds, ou par
Page 38 le temps de l'horloge $d\tau = ds/c$, entre deux points voisins ayant des coordonnées (t, r) et
Page 128 $(t+dt, r+dr)$. Comme nous l'avons vu ci-dessus, la gravité implique qu'en coordonnées sphériques nous ayons

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{c^2} \neq dt^2 - dr^2/c^2 - r^2 d\varphi^2/c^2 \,. \tag{135}$$

Cette inégalité exprime le fait que l'espace-temps est *courbé*. En réalité, les expériences sur la variation du temps avec la hauteur confirment que l'intervalle d'espace-temps autour d'une masse sphérique est donné par

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{c^2 - \frac{2GM}{r}} - \frac{r^2}{c^2} d\varphi^2 \,. \tag{136}$$

Cette expression est appelée la *métrique de Schwarzschild* d'après l'un de ses décou-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vreurs*. La métrique (136) décrit la forme courbée de l'espace-temps situé autour d'une masse sphérique qui n'est pas en rotation. Elle est bien approchée par celle de la Terre ou du Soleil. (Pourquoi leur rotation peut-elle être négligée ?) L'expression (136) indique également que l'intensité de la gravité autour d'un corps de masse M et de rayon R est quantifiée par un nombre h sans dimension défini comme suit

Défi 175 s

$$h = \frac{2G}{c^2}\frac{M}{R} \,. \tag{137}$$

Ce rapport explicite la tension gravitationnelle avec laquelle les longueurs et le vide sont déformés par rapport à la situation plate de la relativité restreinte, et donc détermine également la durée de ralentissement des horloges lorsque la gravité entre en jeu. (Ce rapport indique aussi à quelle distance nous nous trouvons de n'importe quel horizon possible.) À la surface de la Terre, le rapport h possède la minuscule valeur de $1,4 \cdot 10^{-9}$; à la surface du Soleil, elle possède la valeur, dans une certaine mesure plus importante, de $4,2 \cdot 10^{-6}$. La précision des horloges modernes nous permet de déceler des effets aussi ténus plutôt facilement. Nous discuterons bientôt des diverses conséquences et usages de la déformation de l'espace-temps.

Nous remarquons que si une masse est fortement concentrée, en particulier quand son rayon devient *égal* à son *rayon de Schwarzschild*

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \,, \tag{138}$$

la métrique de Schwarzschild se comporte bizarrement : à cet emplacement, *le temps disparaît* (remarquez que t représente le temps à l'infini). Au rayon de Schwarzschild, le temps local (indiqué par une horloge située à l'infini) s'arrête – et un horizon apparaît. Nous explorerons plus bas ce qui se passe précisément. Cette situation n'est pas commune : le rayon de Schwarzschild pour une masse comme la Terre est de 8,8 mm, et pour le Soleil de 3,0 km. Vous devriez pouvoir vérifier que la taille de chaque objet de la vie quotidienne est supérieure à son rayon de Schwarzschild. Des corps qui atteignent cette limite sont appelés des *trous noirs*, nous les étudierons en détail prochainement. En fait, la relativité générale stipule qu'*aucun* système dans la nature n'est plus petit que sa taille de Schwarzschild, en d'autres termes que le rapport h défini par l'expression (137) n'est jamais supérieur à 1.

Page 244
Défi 176 e
Réf. 109

En résumé, les résultats mentionnés jusqu'ici établissent clairement que *la masse engendre la courbure*. L'équivalence masse–énergie que nous connaissons en relativité restreinte nous enseigne que, par conséquent, l'espace devrait également être courbé par la présence de n'importe quel type d'énergie–impulsion. Chaque type d'énergie courbe l'espace-temps. Par exemple, la lumière devrait également le courber. Cependant, même les rayons de plus forte énergie que nous puissions créer correspondent à des masses

* Karl Schwarzschild (1873–1916) fut un important astronome allemand, il fut un des premiers à comprendre la relativité générale. Il publia sa formule en décembre 1915, seulement quelques mois après qu'Einstein eut publié ses équations du champ. Il décéda prématurément à 42 ans, ce qui attrista énormément Einstein. Nous déduirons la forme de la métrique plus loin, directement à partir des équations du champ de la relativité générale. L'autre inventeur de cette métrique, inconnu d'Einstein, fut le physicien hollandais J. Droste.

Réf. 108

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

extrêmement petites, et donc à des courbures infinitésimales. Même la chaleur courbe l'espace-temps, mais, dans la plupart des systèmes, la chaleur ne représente approximativement qu'une fraction de 10^{-12} de la masse totale, son effet sur la courbure n'est donc pas mesurable et est négligeable. Néanmoins, il est toujours possible de montrer expérimentalement que l'énergie courbe l'espace. Dans presque tous les atomes, une portion considérable de la masse est due à l'énergie électrostatique qui existe entre les protons chargés positivement. En 1968 Kreuzer confirma que l'énergie courbe l'espace à l'aide
Réf. 110 d'une expérience astucieuse utilisant une masse flottante.

Nous pouvons immédiatement imaginer que l'avancement inégal des horloges est
Défi 177 pe l'équivalent temporel de la courbure spatiale. En rassemblant ces deux notions, nous concluons que lorsque la gravité est présente l'*espace-temps* est courbé.

Résumons notre chapelet de réflexions. L'énergie est équivalente à la masse, la masse engendre la gravité, celle-ci est équivalente à l'accélération, l'accélération est le temps dépendant de la position. Puisque la vitesse de la lumière est constante, nous en déduisons que *l'énergie–impulsion dicte à l'espace-temps de se courber*. Cet énoncé représente la première moitié de la relativité générale.

Nous découvrirons bientôt comment mesurer la courbure, comment la calculer à partir de l'énergie–impulsion et ce que nous constatons lorsque les mesures et les calculs sont comparés. Nous découvrirons également que des observateurs distincts mesurent des valeurs de courbure différentes. L'ensemble des transformations qui associent un point de vue à un autre en relativité générale, la *symétrie difféomorphisme*, nous apprendra comment relier les mesures faites par des observateurs différents.

Puisque la matière se déplace, nous pouvons même en dire plus. Non seulement l'espace-temps est courbé près des masses, mais il se met aussi à onduler comme des vagues après qu'une masse est passée à proximité. En d'autres termes, la relativité générale stipule que l'espace, de même que l'espace-temps, est *élastique*. Cependant, il est
Réf. 111 plutôt rigide : beaucoup plus rigide que l'acier. Pour courber une région de l'espace de 1 % il faut une densité d'énergie considérablement plus importante que pour courber un
Défi 178 pe simple rail de chemin de fer de 1 %. Tout cela, ainsi que d'autres conséquences intéressantes de l'élasticité de l'espace-temps, nous absorbera durant le reste de ce chapitre.

La vitesse de la lumière et la constante gravitationnelle

> « Si morior, moror*. »

Nous poursuivons notre chemin vers une compréhension précise de la gravitation. Toute notre connaissance théorique et empirique concernant la gravité peut être résumée en seulement deux formulations générales. Le premier principe établit que :

▷ *La vitesse v d'un système physique est bornée par :*

$$v \leqslant c \tag{139}$$

pour tous les observateurs, où c représente la vitesse de la lumière.

* « Si je m'arrête, je meurs. » C'est la devise de l'oiseau de paradis.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La théorie qui découle de ce premier principe, la relativité *restreinte*, est étendue à la relativité *générale* en y ajoutant un deuxième principe, caractérisant la gravitation. Il existe plusieurs manières équivalentes de formuler ce principe. En voici une.

▷ *Pour tous les observateurs, la force F agissant sur un système est limitée par*

$$F \leqslant \frac{c^4}{4G} \,, \tag{140}$$

où G représente la constante universelle de la gravitation.

En bref, il existe une force maximale dans la nature. La gravitation conduit à l'attraction entre les masses. Cependant, cette force d'attraction est restreinte. Une formulation
Défi 179 e équivalente est :

▷ *Pour tous les observateurs, la taille L d'un système de masse M est limitée par*

$$\frac{L}{M} \geqslant \frac{4G}{c^2} \,. \tag{141}$$

En d'autres termes, un système massif ne peut pas être plus concentré qu'un trou noir de même masse qui n'est pas en rotation. Une autre façon d'exprimer le principe de la gravitation est la suivante :

▷ *Pour tous les systèmes, la puissance émise P est restreinte par*

$$P \leqslant \frac{c^5}{4G} \,. \tag{142}$$

En bref, il existe une puissance maximale dans la nature.

Les trois limitations citées ci-dessus sont toutes équivalentes, et aucune exception n'est connue ou réellement possible. Ces limites incluent la gravitation universelle dans le cas non relativiste. Elles nous disent *ce qu'est* la gravité, à savoir la courbure, et *comment* elle se comporte exactement. Ces limites nous permettent de déterminer la courbure dans toutes les situations, pour tous les événements de l'espace-temps. Comme nous l'avons
Page 98 vu ci-dessus, la vitesse limite associée à n'importe lequel des trois derniers principes implique toute la relativité générale*.

Par exemple, pouvez-vous montrer que la formule décrivant le décalage vers le rouge gravitationnel est conforme à la limite générale (141) pour les rapports longueur sur
Défi 180 pe masse ?

Nous remarquons que toute formule qui contient la vitesse de la lumière c est fondée sur la relativité restreinte et, si elle contient la constante de la gravitation G, elle est reliée à la gravitation universelle. Si une formule contient *à la fois* c et G, elle est propre à la relativité générale. Le présent chapitre soulignera souvent cette correspondance.

Jusqu'à présent, notre ascension de la montagne nous a appris qu'une description précise du mouvement exige la caractérisation de tous les points de vue autorisés, leurs

* Cette approche didactique n'est pas conventionnelle. Il est possible qu'elle ait été initiée par le présent
Réf. 112 auteur. Le physicien britannique Gary Gibbons l'a également développée de manière indépendante. Des références plus anciennes ne sont pas connues.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

particularités, leurs différences, et les transformations possibles entre eux. Désormais, *tous* les points de vue sont permis, sans exception : quiconque doit être capable de communiquer avec n'importe qui d'autre. Il n'y a aucune différence entre un observateur qui ressent la gravité, celui qui est en chute libre, celui qui est accéléré ou celui qui est en mouvement inertiel. En outre, les individus qui intervertissent la gauche et la droite, ceux qui échangent le haut et le bas ou les gens qui affirment que le Soleil tourne autour de la Terre doivent pouvoir se parler entre eux, et avec nous. Cela introduit un ensemble beaucoup plus vaste de transformations des points de vue que dans le cas de la relativité restreinte, et rend la relativité générale à la fois difficile et captivante. Et puisque tous les points de vue sont autorisés, la description du mouvement qui en résulte est *complète*[*].

POURQUOI UNE PIERRE JETÉE EN L'AIR RETOMBE-T-ELLE SUR LA TERRE ? – LES GÉODÉSIQUES

> « Un génie est une personne qui fait toutes les erreurs possibles dans le temps le plus court possible. »
>
> Anonyme

Dans notre discussion de la relativité restreinte, nous avons vu que le mouvement inertiel ou de flottaison libre est le mouvement qui associe deux événements qui nécessitent *le plus long* temps propre. En l'absence de la gravité, le mouvement qui satisfait cette condition est un mouvement en *ligne droite* (rectiligne). D'autre part, nous sommes également habitués à imaginer les rayons lumineux comme étant droits. En réalité, nous avons tous l'habitude de vérifier la rectitude d'une bordure en l'observant de profil sur toute sa longueur. À chaque fois que nous dessinons les axes d'un système de coordonnées physique, nous imaginons que nous traçons soit des trajectoires de rayons lumineux soit celles du mouvement de corps se déplaçant librement.

Page 74
Page 47

En l'absence de la gravité, les trajectoires d'objets et celles de la lumière coïncident. Cependant, si la gravité est présente, les objets ne se déplacent plus le long de trajets lumineux, comme l'indique chaque pierre lancée en l'air. La lumière ne définit plus la notion de rectitude spatiale. En présence de la gravité, les trajets de la lumière et de la matière sont tous les deux courbés, bien que ce soit avec des amplitudes *différentes*. Mais la formulation originale reste valide : même quand la gravité est présente, les corps suivent des trajectoires de plus long temps propre possible. Pour la matière, de tels trajets sont appelés des *géodésiques de genre temps*. Pour la lumière, ils sont dénommés des *géodésiques nulles* ou *de genre lumière*.

Nous remarquons que dans l'espace-temps les géodésiques sont les courbes qui ont la longueur *maximale*. C'est en contradiction avec le cas purement spatial, telle la surface d'une sphère, où les géodésiques sont les courbes de longueur *minimale*. En termes simples, *les pierres retombent parce qu'elles suivent des géodésiques*. Faisons quelques vérifications concernant cette affirmation.

Puisque les pierres se déplacent en maximisant le temps propre pour des observateurs inertiels, elles doivent en faire autant pour des observateurs chutant librement, comme Kittinger. En fait, elles doivent en faire autant pour tous les observateurs. Au moins, l'équivalence entre les trajectoires de chute et les géodésiques reste cohérente.

[*] Ou du moins devrait-elle l'être, s'il n'y avait pas une minuscule déviation appelée théorie quantique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

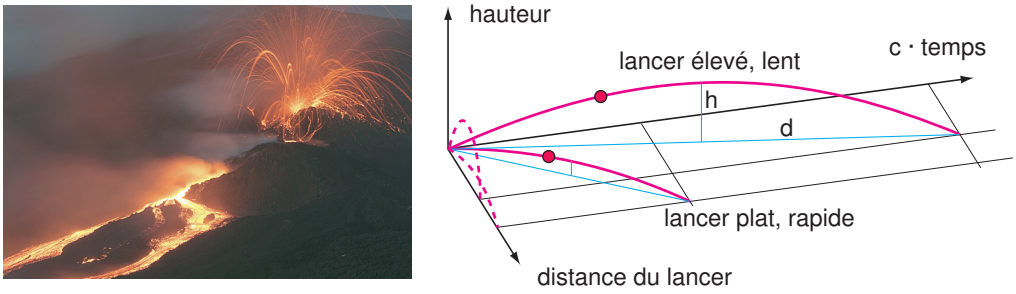


FIGURE 54 Toutes les trajectoires des pierres voltigeant en l'air, indépendamment de leurs vitesses et de leurs angles, ont la même courbure dans l'espace-temps. (Photographie © Marco Fulle)

Si la chute est perçue comme étant une conséquence du rapprochement de la surface de la Terre – comme nous le discuterons plus tard –, nous pouvons déduire directement
Défi 181 pe que la chute implique un temps propre qui est aussi long que possible. La chute libre est en réalité un mouvement qui suit des géodésiques.

Nous avons vu plus haut que la gravitation découle de l'existence d'une force maximale. Ce résultat peut être visualisé d'une autre manière. Si l'attraction gravitationnelle entre un corps central et un satellite était *plus forte* qu'elle ne l'est, les trous noirs seraient plus petits qu'ils ne le sont. Dans ce cas, les limites de la force maximale et de la vitesse maximale pourraient être dépassées en s'approchant suffisamment d'un tel trou noir. Si, d'autre part, la gravitation était *plus faible* qu'elle ne l'est, il y aurait des observateurs pour lesquels les deux astres n'interagiraient pas, donc pour lesquels ils ne formeraient pas un système physique. En résumé, une force maximale de $c^4/4G$ implique la gravitation universelle. Il n'y a aucune différence entre l'affirmation que tous les corps s'attirent à travers la gravitation et celle qu'il existe une force maximale dont la valeur est déterminée par $c^4/4G$. Mais en même temps, le principe de la force maximale implique que les
Défi 182 pe objets se déplacent le long de géodésiques. Pouvez-vous le montrer ?

Tournons-nous vers une vérification expérimentale. Si la chute est une conséquence de la courbure, alors les trajectoires de *toutes* les pierres jetées ou chutant près de la Terre doivent avoir la *même* courbure dans l'espace-temps. Prenez une pierre lancée horizontalement, une pierre jetée verticalement, une pierre jetée avec vigueur, ou une pierre lancée mollement : un bref raisonnement permet de montrer que *dans l'espace-temps*
Défi 183 pe toutes leurs trajectoires sont approchées avec une grande précision par des arcs de cercle, comme indiqué sur la Figure 54. Toutes les trajectoires possèdent le *même* rayon de courbure r, donné par :

$$r = \frac{c^2}{g} \approx 9{,}2 \cdot 10^{15}\,\mathrm{m}\,. \tag{143}$$

La valeur énorme du rayon, correspondant à une faible courbure, explique pourquoi nous ne la remarquons pas dans notre vie de tous les jours. La forme parabolique, caractéristique de la trajectoire d'une pierre dans la vie courante, représente juste la projection de la trajectoire plus fondamentale dans l'espace-temps quadridimensionnel sur l'espace tridimensionnel. La remarque importante est que la valeur de la courbure *ne* dépend *pas* des conditions du lancer. En fait, ce résultat élémentaire aurait pu suggérer les idées de la

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

relativité générale aux chercheurs un siècle avant Einstein ; ce qui manquait était l'identification de l'importance de la vitesse de la lumière comme vitesse limite. Dans tous les cas, ce calcul simple confirme que la chute et la courbure sont reliées. Comme attendu, et comme il a déjà été mentionné ci-dessus, la courbure décroît avec l'augmentation de la hauteur, jusqu'à ce qu'elle disparaisse à une distance infinie de la Terre. Maintenant, étant donné que toutes les trajectoires pour la chute libre ont la même courbure, et étant donné que toutes ces trajectoires sont des chemins de moindre action, on en déduit immédiatement qu'elles sont également des géodésiques.

Si nous décrivons la chute comme une conséquence de la courbure de l'espace-temps, nous devons montrer que la description avec les géodésiques reproduit toutes ses caractéristiques. En particulier, nous devons être capables d'expliquer le fait que les pierres lancées avec une vitesse faible retombent, et que celles propulsées avec une vitesse importante s'échappent. Pouvez-vous déduire cela à partir de la courbure spatiale ?

Défi 184 pe

En résumé, le mouvement de n'importe quelle particule chutant librement « dans un champ gravitationnel » est décrit par le même principe variationnel que le mouvement d'une particule libre en relativité restreinte : la trajectoire maximise le temps propre $\int \mathrm{d}\tau$. Nous le reformulons en disant qu'une particule quelconque en chute libre du point A au point B minimise l'action S donnée par

$$S = -mc^2 \int_A^B \mathrm{d}\tau \,. \tag{144}$$

C'est tout ce que nous avons besoin de connaître concernant la chute libre des objets. En conséquence, *toute déviation par rapport à la chute libre vous rajeunit*. Plus l'écart est important, plus vous restez jeune.

Comme nous le verrons ci-après, la description de l'action minimale de la chute libre a été contrôlée avec beaucoup de précision, et l'expérience n'a pas décelé le moindre écart. Nous découvrirons aussi que, pour la chute libre, les prédictions de la relativité générale et de la gravitation universelle diffèrent de manière significative, à la fois pour les particules proches de la vitesse de la lumière et pour les corps centraux de densité élevée. Jusqu'ici, toutes les expériences ont montré qu'à chaque fois que les deux prédictions étaient différentes la relativité générale était exacte, et que la gravitation universelle ou toute description alternative était fausse.

Page 267

Réf. 113

Tous les corps chutent le long de géodésiques. Cela nous indique quelque chose d'important. La façon dont les corps chutent ne dépend pas de leur masse. Les géodésiques sont comme des « rails » dans l'espace-temps qui indiquent aux corps comment tomber. En d'autres termes, l'espace-temps peut vraiment être imaginé comme une entité unique, énorme, déformée. L'espace-temps n'est pas un « néant », c'est une réalité issue de notre réflexion. La forme de cette entité indique aux objets comment se déplacer. L'espace-temps est donc en réalité assimilable à un matelas impalpable, ce matelas déformé guidant les objets qui chutent le long de ses réseaux de géodésiques.

Qui plus est, l'énergie *de liaison* chute de la même manière que la masse, comme on le prouve en comparant la chute d'objets constitués de matériaux différents. Ils possèdent des pourcentages différents d'énergie de liaison. (Pourquoi ?) Par exemple, sur la Lune, où il n'y a pas d'air, les astronautes lâchent des boules en acier et des plumes, et remarquent qu'elles tombent ensemble, les unes à côté des autres. L'indépendance de la

Défi 185 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 114 composition matérielle pour la chute a été vérifiée et confirmée maintes et maintes fois.

La lumière peut-elle tomber ?

Comment le rayonnement tombe-t-il ? La lumière, comme tout rayonnement, est de l'énergie possédant une masse inertielle nulle. Elle se déplace comme un courant d'entités lumineuses extrêmement rapides. Par conséquent, les écarts par rapport à la gravitation universelle deviennent plus flagrants dans le cas de la lumière. Comment la lumière tombe-t-elle ? La lumière ne peut pas modifier sa vitesse. Quand elle chute verti-
Page 124 calement, elle change uniquement de couleur, comme nous l'avons vu ci-dessus. Mais la lumière peut également changer de direction. Bien avant que les idées de la relativité
Réf. 115 ne deviennent populaires, en 1801, l'astronome prussien Johann Soldner comprit que la gravitation universelle implique que la lumière est *déviée* lorsqu'elle passe à proximité d'une masse. Il calcula également dans quelle mesure l'angle de déviation dépend de la
Page 139 masse du corps et de la distance de la trajectoire du rayon lumineux. Pourtant, personne au cours du dix-neuvième siècle ne fut capable de vérifier ce résultat expérimentalement.

Évidemment, la lumière possède de l'énergie, et l'énergie a un poids. La déviation de la lumière en elle-même *ne* constitue *pas* une pièce à conviction pour la courbure de l'espace. La relativité générale prédit également un angle de déviation pour la lumière frôlant des masses, mais du *double* de la valeur classique de Soldner, parce que la courbure de l'espace autour de grosses masses s'ajoute à l'effet de la gravitation universelle. La déviation de la lumière ne confirme donc la courbure de l'espace que si sa grandeur *s'accorde* avec celle prédite par la relativité générale. C'est effectivement le cas : les observations
Page 162 coïncident avec les prédictions. Nous allons donner bientôt un peu plus de détails.

La masse n'est donc pas nécessaire pour ressentir la gravité, l'énergie est suffisante. On doit se familiariser avec cette notion de l'équivalence masse–énergie lorsque l'on étudie la relativité générale. En particulier, la lumière n'entre pas dans la catégorie poids plume, mais est plutôt lourde. Pouvez-vous étayer le fait que la courbure de la lumière
Défi 186 pe près de la Terre doit être la même que celle des pierres, donnée par l'expression (143) ?

En résumé, toutes les expériences montrent que l'énergie, tout comme la masse, chute le long des géodésiques, quel que soit son type (liée ou libre) et quelle que soit l'interaction en jeu (fût-elle électromagnétique ou nucléaire). De plus, le mouvement du rayonnement confirme que l'espace-temps est courbé.

Puisque les expériences démontrent que toutes les particules tombent de la même manière, indépendamment de leur masse, de leur charge ou de toute autre propriété, nous pouvons en conclure que le système constitué de toutes les trajectoires possibles forme une structure indépendante. Cette structure est ce que nous appelons l'*espace-temps*.

Nous remarquons donc que *l'espace-temps indique à la matière, à l'énergie et au rayonnement comment ils doivent tomber*. Cette proposition représente la seconde moitié de la relativité générale. Elle complète la première partie, qui stipule que l'énergie spécifie à l'espace-temps comment il doit se courber. Pour achever la description du mouvement macroscopique, nous avons juste besoin de rendre ces formulations plus quantitatives, de telle manière qu'elles puissent devenir réfutables. Comme d'habitude, nous pouvons procéder de deux manières différentes : nous pouvons déduire ces équations directement du mouvement, ou nous pouvons d'abord déterminer le lagrangien correspondant puis

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

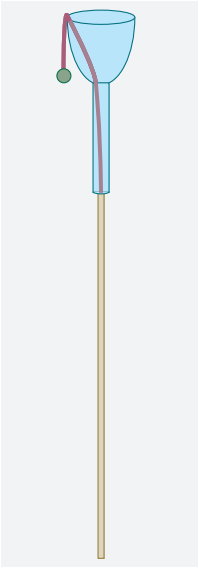


FIGURE 55 Un casse-tête : quelle est la façon la plus simple de mettre la balle attachée au fil élastique dans la coupe ?

en déduire les équations du mouvement. Mais, avant de faire cela, divertissons-nous un peu.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA GRAVITATION

> « Wenn Sie die Antwort nicht gar zu ernst nehmen und sie nur als eine Art Spaß ansehen, so kann ich Ihnen das so erklären : Früher hat man geglaubt, wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig. Nach der Relativitätstheorie verschwinden aber auch Zeit und Raum mit den Dingen*. »
>
> Albert Einstein en 1921 à New York.

Prenez une bouteille en plastique et faites quelques trous près de sa base. Remplissez la bouteille avec de l'eau et bouchez les trous avec vos doigts. Si vous laissez tomber la bouteille, l'eau ne quittera pas celle-ci durant la chute. Pouvez-vous expliquer comment cette expérience confirme l'équivalence entre le repos et la chute libre ? Défi 187 s

* *

Lors de son soixante-seizième anniversaire, Einstein reçut un cadeau spécialement conçu pour lui, indiqué sur la Figure 55. Une coupe plutôt profonde est montée sur le haut d'un manche à balai. La coupe contient un petit morceau de fil élastique, attaché à son fond, à l'autre extrémité duquel une balle est fixée. En position initiale, la balle est suspendue

* « Si vous ne prenez pas cette réponse trop au sérieux et la considérez uniquement comme une distraction, je peux vous l'expliquer de la manière suivante : par le passé nous pensions que, si toutes les choses disparaissaient du monde, l'espace et le temps seraient ce qui resterait. Mais, en suivant la théorie de la relativité, l'espace et le temps disparaîtraient en même temps que les choses. »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à l'extérieur de la coupe. Le fil élastique est trop mince pour vaincre la gravité et tirer la balle dans la coupe. Quelle est la manière la plus élégante de placer la balle dans la coupe ?

Défi 188 s

* *

La gravité possède les mêmes propriétés partout dans l'Univers – sauf dans le bureau des brevets américain. En 2005, il accorda un brevet, n° 6 960 975, pour un dispositif d'antigravité qui fonctionne en déformant l'espace-temps d'une manière telle que la gravité se trouve « compensée » (allez sur patft.uspto.gov). Connaissez-vous un dispositif plus simple ?

Défi 189 s

* *

Le rayon de courbure de l'espace-temps à la surface de la Terre est de $9{,}2 \cdot 10^{15}$ m. Pouvez-vous confirmer cette valeur ?

Défi 190 e

* *

Un morceau de bois flotte sur l'eau. Émergera-t-il un peu plus ou un peu moins dans un ascenseur qui accélère vers le haut ?

Défi 191 pe

* *

Nous avons vu en relativité restreinte que si des jumeaux sont accélérés de manière identique dans la même direction, sachant qu'un jumeau se tient à une certaine distance devant l'autre, alors le jumeau situé devant vieillit plus vite que le jumeau resté derrière. Cela se produit-il également dans un champ gravitationnel ? Et que se passe-t-il lorsque le champ varie avec la hauteur, comme sur Terre ?

Page 50

Défi 192 pe

* *

Une force maximale et une puissance maximale impliquent également un flux maximal de masse. Pouvez-vous montrer qu'aucun flux de masse ne peut excéder $1{,}1 \cdot 10^{35}$ kg/s ?

Défi 193 pe

* *

Les expériences des figures 50 et 51 diffèrent sur un point : l'une se passe dans un espace plat, l'autre dans un espace courbe. L'une semble être reliée à la conservation de l'énergie, l'autre pas. Ces différences contredisent-elles l'équivalence des observations ?

Défi 194 pe

* *

Comment les cosmonautes peuvent-ils eux-mêmes se peser pour vérifier qu'ils ont assez mangé ?

Défi 195 s

* *

Un cosmonaute en orbite flotte-t-il réellement librement ? Non. Il apparaît que les stations orbitales et les satellites sont accélérés par plusieurs effets minuscules. Les plus importants sont la pression de la lumière issue du Soleil, le frottement de l'air ténu, et les effets du vent solaire. (Les micrométéorites peuvent généralement être négligées.) Ces trois effets entraînent tous des accélérations de l'ordre de 10^{-6} m/s^2 à 10^{-8} m/s^2, en fonction de l'altitude de l'orbite. Pouvez-vous estimer combien de temps il faudrait à une pomme

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

flottant dans l'espace pour frapper la paroi d'une station orbitale, sachant qu'elle se situe au départ au milieu ? Par ailleurs, quelle est la grandeur des accélérations de marée dans cette situation ?

Défi 196 s

* *

Il n'existe pas de masse négative dans la nature, comme nous en avons déjà débattu au début de notre promenade (même l'antimatière possède une masse *positive*). Cela signifie que, à la différence des interactions électromagnétiques, rien ne peut se soustraire à la gravitation. Puisque la gravitation ne peut pas être évitée, il n'y a aucune manière de concevoir un système parfaitement isolé. Mais de tels systèmes forment la base de la thermodynamique ! Nous étudierons les implications fascinantes de cela plus tard : par exemple, nous découvrirons une *limite supérieure* pour l'entropie des systèmes physiques.

Page 78

Page ??

* *

L'espace courbe peut-il être utilisé pour voyager plus vite que la lumière ? Imaginez un espace-temps dans lequel deux points peuvent être connectés, soit par un itinéraire qui traverse une zone plate, soit par un deuxième trajet qui traverse une zone partiellement courbée. Cette zone courbée pourrait-elle être utilisée pour voyager entre les points plus rapidement qu'à travers celle qui est plate ? Mathématiquement, c'est possible ; toutefois, un tel espace courbé aurait besoin d'avoir une densité d'énergie *négative*. Une telle situation est incompatible avec la définition de l'énergie et avec l'inexistence avérée de masses négatives. Le postulat que cela ne se produit pas dans la nature est également appelé la *condition faible sur l'énergie*. Est-elle implicitement suggérée par la limite des rapports longueur sur masse ?

Réf. 116

Défi 197 pe

* *

La proposition d'une limite de la longueur par rapport à la masse $L/M \geqslant 4G/c^2$ invite les expérimentateurs à tenter de la surpasser. Pouvez-vous expliquer ce qui se produit lorsqu'un observateur se déplace si rapidement vers une masse que la contraction de la longueur du corps parvient à la limite ?

Défi 198 pe

* *

Il existe une propriété mathématique primordiale de $\mathbb{R}^3$ qui distingue l'espace tridimensionnel de toutes les autres possibilités. Une courbe (unidimensionnelle) fermée peut former des nœuds *uniquement* dans $\mathbb{R}^3$: dans n'importe quel autre nombre supérieur de dimensions, elle peut toujours être dénouée. (L'existence des nœuds explique également pourquoi le nombre trois représente le plus petit nombre de dimensions qui permet aux particules d'avoir un mouvement chaotique.) Néanmoins, la relativité générale ne dit pas *pourquoi* l'espace-temps possède quatre dimensions. Elle est simplement fondée sur la réalité. Cette question ardue et profonde ne sera résolue que dans la dernière partie de notre ascension de la montagne.

* *

Henri Poincaré, qui est décédé en 1912, peu avant que la théorie de la relativité générale ne fût achevée, pensait depuis un certain temps que l'espace courbe n'était pas une néces-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sité, mais seulement une possibilité. Il imaginait que nous pouvions continuer à utiliser l'espace euclidien à condition que nous autorisions la lumière à suivre des trajectoires courbées. Pouvez-vous élucider pourquoi une telle théorie est impossible ?

Défi 199 pe

* *

Deux atomes d'hydrogène peuvent-ils tourner l'un autour de l'autre, dans leur champ gravitationnel mutuel ? Quelle serait la taille de cette « molécule » ?

Défi 200 s

* *

Deux impulsions lumineuses peuvent-elles tourner l'une autour de l'autre, dans leur champ gravitationnel mutuel ?

Défi 201 s

* *

Les divers mouvements de la Terre mentionnés dans la section sur la physique galiléenne, tels que sa rotation autour de son axe ou autour du Soleil, conduisent à plusieurs variantes de temps en physique et en astronomie. Le temps défini par les meilleures horloges atomiques est baptisé *temps dynamique terrestre* ou TDT. En introduisant des sauts de quelques secondes de temps en temps pour compenser la mauvaise définition de la seconde (une rotation terrestre ne dure pas 86 400 mais 86 400,002 secondes) et, accessoirement, pour compenser le ralentissement de la rotation de la Terre, nous obtenons le *temps universel coordonné* ou TUC. Il existe alors un temps dérivé de celui-ci qui prend en compte toutes les corrections de l'ordre de quelques secondes. Nous aurions ainsi le temps – distinct – qui serait indiqué par une horloge non rotative située au centre de la Terre. Finalement, il y a le *temps dynamique barycentrique* ou TDB, qui est le temps qui serait indiqué par une horloge située au centre de masse du Système solaire. C'est en utilisant ce dernier uniquement que les satellites peuvent être guidés de manière fiable à travers le Système solaire. En résumé, la relativité dit adieu au Temps Moyen de Greenwich, comme le fit en son temps la loi britannique, dans une des rares situations où la loi a écouté la science. (Seule la BBC continue de l'utiliser.)

Page 84

Page 283

Réf. 117

* *

Les agences spatiales *doivent* donc tenir compte de la relativité générale si elles veulent envoyer des satellites artificiels vers Mars, Vénus ou des comètes. Sans celle-ci, les orbites ne seraient pas calculées avec exactitude, et les satellites manqueraient leur cible et même carrément la planète elle-même. En réalité, les agences spatiales jouent la carte de la sécurité : elles utilisent une généralisation de la relativité générale, à savoir le *formalisme post-newtonien paramétrisé*, qui effectue une vérification continuelle pour savoir si la relativité générale est correcte. Aucune déviation n'a été décelée jusqu'à présent, aux erreurs de mesures près*.

* Pour donner une idée de ce que cela signifie, le formalisme post-newtonien *non paramétrisé*, fondé sur la relativité générale, compose l'équation du mouvement d'un corps de masse m près d'une grande masse M comme un développement de l'expression en l'inverse du carré, pour l'accélération a :

$$a = \frac{GM}{r^2} + f_2 \frac{GM}{r^2}\frac{v^2}{c^2} + f_4 \frac{GM}{r^2}\frac{v^4}{c^4} + f_5 \frac{Gm}{r^2}\frac{v^5}{c^5} + \cdots \tag{145}$$

Ici les facteurs numériques f_n sont évalués à partir de la relativité générale et sont du premier ordre. Les

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

La relativité générale est également utilisée par les agences spatiales tout autour du monde pour calculer les positions exactes des satellites et pour ajuster les radios à la fréquence des émetteurs radio situés sur ceux-ci. De plus, la relativité générale est cruciale pour le *système de positionnement mondial* (en anglais *global positioning system* ou GPS). Cet outil moderne de navigation* est composé de 24 satellites équipés d'horloges, qui couvrent la surface du globe. Pourquoi ce système nécessite-t-il la relativité générale pour pouvoir fonctionner ? Puisque tous les satellites, de même que n'importe qui à la surface de la Terre, voyagent le long de cercles, nous avons $\mathrm{d}r = 0$, et nous pouvons réécrire la métrique de Schwarzschild (136) ainsi

Réf. 118

$$\left(\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}t}\right)^2 = 1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{r^2}{c^2}\left(\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}\right)^2 = 1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{v^2}{c^2} \,. \tag{146}$$

Pour la relation entre le temps du satellite et le temps terrestre, nous obtenons alors

Défi 202 e

$$\left(\frac{\mathrm{d}t_{\mathrm{sat}}}{\mathrm{d}t_{\mathrm{Terre}}}\right)^2 = \frac{1 - \frac{2GM}{r_{\mathrm{sat}}c^2} - \frac{v_{\mathrm{sat}}^2}{c^2}}{1 - \frac{2GM}{r_{\mathrm{Terre}}c^2} - \frac{v_{\mathrm{Terre}}^2}{c^2}} \,. \tag{147}$$

Pouvez-vous déduire de combien de microsecondes une horloge de satellite avance chaque jour, étant donné que les satellites GPS font le tour de la Terre une fois toutes les douze heures ? Puisqu'un décalage de trois microsecondes seulement entraînerait une erreur sur la position d'un kilomètre au bout d'une seule journée, les horloges dans les satellites doivent être réajustées de la quantité calculée pour avancer plus lentement. Les ajustements nécessaires sont contrôlés, et jusqu'ici chaque jour qui s'est écoulé depuis que le système est entré en fonctionnement a confirmé la relativité générale, aux erreurs expérimentales près.

Défi 203 s

Réf. 119

* *

La relativité générale est à la base du sport dénommé *géocaching*, sorte de chasse au trésor internationale utilisant des récepteurs GPS. Consultez les sites Web www.terracaching.com et www.geocaching.com pour avoir plus d'informations.

* *

La constante de la gravitation G ne semble pas varier au cours du temps. Les dernières

Réf. 120

deux premiers termes impairs sont omis à cause de la réversibilité (approximative) du mouvement en relativité générale : l'émission d'ondes gravitationnelles, qui est irréversible, compte pour le minuscule terme f_5. Remarquez qu'il contient la petite masse m au lieu de la grosse masse M. Tous les facteurs f_n jusqu'à f_7 ont maintenant été calculés. Cependant, dans le Système solaire, seul le terme f_2 a déjà été détecté. Cette situation pourrait changer avec les futures expériences utilisant des satellites de haute précision. Des effets d'ordres supérieurs, jusqu'à f_5, ont été mesurés dans les pulsars binaires, comme discuté ci-après.

Page 160

Dans un formalisme post-newtonien *paramétrisé*, tous les facteurs f_n, y compris ceux qui sont impairs, sont ajustés par rapport aux données recueillies, jusqu'ici tous ces ajustements concordent avec les valeurs prédites par la relativité générale.

* Pour plus d'informations, consultez le site Web www.gpsworld.com.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

expériences restreignent son taux de variation à moins d'une partie pour 10^{12} par an. Pouvez-vous imaginer comment cela peut être vérifié ?

Défi 204 d

* *

La sensation que nous éprouvons de vivre dans trois dimensions d'espace seulement pourrait-elle être due à une limitation de nos facultés sensorielles ? Comment ?

Défi 205 s

* *

Pouvez-vous estimer l'effet de la force de marée sur la couleur de la lumière émise par un atome ?

Défi 206 pe

* *

Le plus fort champ gravitationnel possible est celui d'un petit trou noir. Le champ gravitationnel le plus intense jamais observé est malgré tout plus faible. En 1998, Zhang et Lamb utilisèrent les données issues du rayonnement X d'une étoile double pour déterminer que l'espace-temps à proximité de l'étoile à neutrons d'une taille de 10 km est courbé de 30 % au plus de la valeur maximale possible. Quelle est l'accélération gravitationnelle correspondante, en supposant que l'étoile à neutrons possède la même masse que le Soleil ?

Réf. 121

Défi 207 pe

* *

La déviation de la lumière modifie la taille angulaire δ d'une masse M de rayon r lorsqu'elle est observée à une distance d. Cet effet conduit à la belle expression

Réf. 122

Défi 208 e

$$\delta = \arcsin\left(\frac{r\sqrt{1-R_S/d}}{d\sqrt{1-R_S/r}}\right) \quad \text{où} \quad R_S = \frac{2GM}{c^2} \,. \tag{148}$$

Quel pourcentage de la surface du Soleil un observateur situé à l'infini peut-il voir ? Nous examinerons ce problème plus en détail bientôt.

Défi 209 pe

Page 252

Qu'est-ce que le poids ?

Il n'existe aucune manière pour un *unique* observateur (ponctuel) de distinguer les effets de la gravité de ceux de l'accélération. Cette propriété de la nature nous permet de formuler une étrange assertion : les choses *tombent* parce que la surface de la Terre accélère dans leur direction. Par conséquent, le *poids* d'un objet résulte de l'accélération vers le haut de la surface de la Terre, qui pousse ainsi l'objet. C'est le principe d'équivalence appliqué à la vie quotidienne. Pour la même raison, les objets en chute libre n'ont pas de poids.

Vérifions les ordres de grandeur. Bien évidemment, une surface terrestre en accélération engendre un poids pour chaque corps reposant sur celle-ci. Ce poids est proportionnel à la masse inertielle. En d'autres termes, la masse inertielle d'un corps est identique à la masse gravitationnelle. C'est en réalité ce que les expériences soulignent, et ce jusqu'à la plus haute précision accessible. Roland von Eőtvős* réalisa beaucoup d'expériences

Réf. 123

* Roland von Eőtvős (n. Budapest 1848 , d. *id.* 1919), un physicien hongrois, réalisa de nombreuses expé-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

très précises de ce type tout au long de sa vie, sans jamais découvrir un quelconque désaccord. Dans ces expériences, il utilisait le fait que la masse inertielle détermine les effets centrifuges alors que la masse gravitationnelle détermine la chute libre. (Pouvez-vous imaginer comment il testa la concordance ?) Des expériences récentes ont montré que les deux masses sont égales à 10^{-12} près.

Défi 210 pe
Réf. 123

Toutefois, l'égalité des masses n'est pas une surprise. Si nous revenons sur la définition du rapport des masses comme étant le rapport négatif inverse des accélérations, indépendamment de l'origine des accélérations, nous nous rappelons alors que les mesures des masses ne peuvent pas être utilisées pour distinguer la masse inertielle de la masse gravitationnelle. Comme nous l'avons vu, les deux masses sont égales par définition en physique galiléenne, et ainsi toute cette discussion est véritablement stérile. Le poids est un effet intrinsèque de la masse.

Page 73
Page 141

L'équivalence entre l'accélération et la gravité nous permet d'imaginer la chose suivante. Supposez que vous entriez dans un ascenseur afin de descendre de quelques étages. Vous appuyez sur le bouton. L'ascenseur est poussé vers le haut par la surface terrestre en accélération bien que ce soit d'une valeur plus faible que l'immeuble. L'immeuble est en train de dépasser l'ascenseur, qui prend par conséquent de la distance. Qui plus est, à cause de cette poussée plus faible, au départ tout le monde à l'intérieur de l'ascenseur se sent un peu plus léger. Quand le contact avec l'immeuble est restitué, l'ascenseur est accéléré pour rattraper la surface terrestre en accélération. Par conséquent, nous avons tous l'impression d'être dans une voiture qui accélère fortement, poussés dans la direction opposée à l'accélération : pendant un court instant, nous nous sentons plus lourds, jusqu'à ce que l'ascenseur parvienne à sa destination.

POURQUOI LES POMMES TOMBENT-ELLES ?

> « Vires acquirit eundo. »
>
> Virgile*

Un véhicule en accélération rattrapera en peu de temps un objet projeté devant celui-ci. Pour la même raison, la surface de la Terre rattrape assez vite une pierre jetée en l'air, parce qu'elle est continuellement accélérée vers le haut. Si vous aimez cette façon de voir les choses, imaginez une pomme qui tombe d'un arbre. À l'instant où elle se détache, elle cesse d'être accélérée vers le haut par la branche. La pomme peut dorénavant jouir de la sérénité du véritable repos. À cause de notre perception humaine limitée, nous appelons cet état de repos la chute libre. Malheureusement, la surface de la Terre qui accélère s'approche impitoyablement et, en fonction du temps durant lequel la pomme est restée au repos, la Terre la frappe avec une vitesse plus ou moins importante, provoquant une déformation plus ou moins prononcée de sa forme.

Les pommes qui tombent nous instruisent également sur la manière de ne plus être préoccupé par la déclaration que la gravité est l'avancement inégal d'horloges avec la hauteur. En fait, cette phrase est *équivalente* à l'affirmation que la surface de la Terre est

riences de haute précision sur la gravité. Il découvrit, entre autres, l'effet qui porte son nom. L'université de Budapest a été rebaptisée en son honneur.

* « Elle acquiert des forces dans sa course. » (En référence à la Renommée. [N.D.T.]) Publius Vergilius Maro (n. Andes 70 AV. J.-C. , d. Brundisium 19 AV. J.-C.), tiré de l'*Énéide* 4, 175.

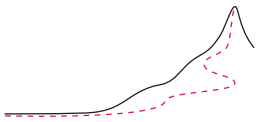
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

accélérée vers le haut, comme l'a montré la discussion ci-dessus.

Ce raisonnement peut-il être prolongé indéfiniment ? Nous pouvons continuer pendant un certain temps. Il est amusant de montrer comment la Terre peut garder un rayon
Défi 211 pe constant alors que sa surface est partout accélérée vers le haut. Nous pouvons alors jouer avec l'équivalence entre l'accélération et la gravité. Cependant, cette équivalence est utile uniquement dans des situations qui font appel à un seul corps accéléré. Elle s'écroule dès que *deux* objets qui chutent sont étudiés. Toute étude de plusieurs corps conduit inévitablement à la conclusion que la gravité n'est pas l'accélération, *la gravité est l'espace-temps courbe*.

De nombreux aspects de la gravité et de la courbure peuvent être appréhendés avec très peu de mathématiques seulement, voire pas du tout. La section suivante mettra en relief certaines des différences qui existent entre la gravitation universelle et la relativité générale, montrant que seule la dernière description s'accorde avec l'expérience. Après cela, quelques concepts concernant la mesure de la courbure seront introduits et appliqués au mouvement des objets et à l'espace-temps. Si le raisonnement devient trop compliqué pour une première lecture, sautez plus loin. De toute façon, la section sur les étoiles, la cosmologie et les trous noirs fera à nouveau usage d'un minimum de mathématiques.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 4

MOUVEMENT EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE – LUMIÈRE COURBÉE ET FLUCTUATION DU VIDE

> « J'ai le sentiment qu'Einstein comprend très bien la théorie de la relativité. »
> Chaim Weitzmann, premier président d'Israël

Avant que nous passions en revue les détails de la relativité générale, nous allons explorer comment le mouvement des objets et de la lumière *diverge* de celui prédit par la gravitation universelle, et comment ces différences peuvent être quantifiées.

CHAMPS FAIBLES

La gravitation est puissante près des horizons. Cela survient lorsque la masse M et l'échelle de distance R vérifient

$$\frac{2GM}{Rc^2} \approx 1\,. \tag{149}$$

Par conséquent, la gravitation est forte principalement dans trois circonstances : près des trous noirs, près de l'horizon de l'Univers, et lorsque des particules possèdent des énergies extrêmement élevées. Les deux premiers cas sont étudiés plus loin, tandis que le troisième sera examiné dans la dernière partie de notre escalade de la montagne. En revanche, dans la plupart des régions de l'Univers, il n'y a *pas* d'horizons proches et, dans ces cas-là, la gravité agit *faiblement*. Malgré la violence des avalanches ou des impacts d'astéroïdes, dans la vie courante la gravité est considérablement plus faible que la force maximale. Sur la Terre, le rapport mentionné ci-dessus ne vaut que 10^{-9} environ. Dans ce cas, et tous les autres de la vie quotidienne, la gravitation peut toujours être approchée par un champ, en dépit de ce que nous avons dit plus haut. Ces situations en champ faible sont intéressantes parce qu'elles sont simples à comprendre, elles nécessitent surtout pour leur explication de prendre en compte l'avancement inégal d'horloges situées à des altitudes différentes. Les situations en champ faible nous permettent de faire allusion, en passant, à la courbure de l'espace-temps, et de continuer à imaginer la gravité comme une source d'accélération. Cependant, la variation du temps avec la hauteur induit déjà de nombreux effets intéressants et inédits. La seule chose dont nous ayons besoin est une démarche relativiste cohérente.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

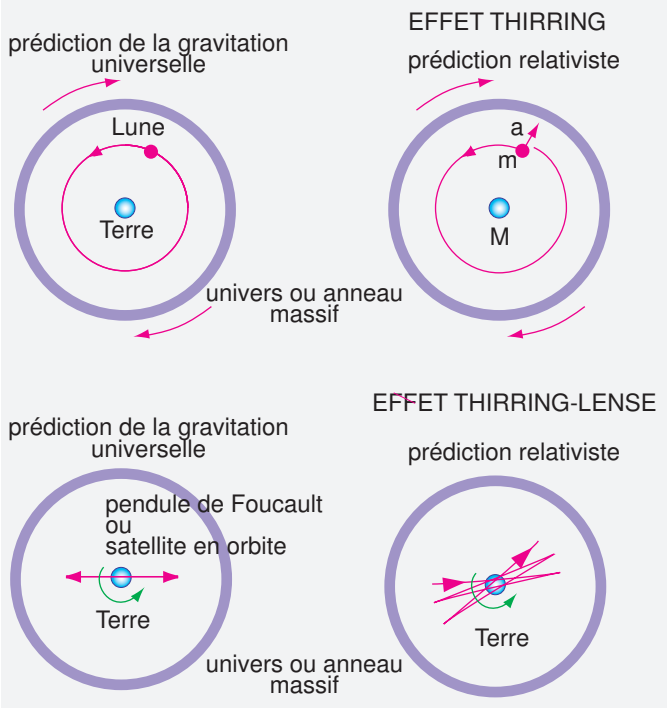


FIGURE 56 Les effets Thirring et Thirring–Lense.

Les effets Thirring

En 1918, le physicien autrichien Hans Thirring publia deux prédictions simples et élégantes de mouvements, dont l'une avec son collaborateur Josef Lense. Aucun de ces deux mouvements ne se produit dans le cadre de la gravitation universelle, mais ils apparaissent tous les deux dans la relativité générale. La Figure 56 montre ces prédictions.

Réf. 124

Dans le premier exemple, aujourd'hui appelé l'*effet Thirring*, on prédit que des accélérations centrifuges ainsi que des accélérations de Coriolis se produisent pour des masses situées à l'intérieur d'une coquille sphérique massive en rotation. Thirring montra que, si une masse sphérique enveloppante tourne, des masses situées dedans sont attirées vers la coquille. L'effet est très petit ; toutefois, cette prédiction est en parfaite contradiction avec celle de la gravitation universelle, dans laquelle une coquille sphérique massive – en rotation ou non – n'agit nullement sur les masses situées en son sein. Pouvez-vous expliquer cet effet en utilisant la figure et l'analogie du matelas ?

Défi 212 pe

Le deuxième effet, l'*effet Thirring–Lense**, est plus connu. La relativité générale prévoit qu'un pendule de Foucault en oscillation, ou un satellite faisant le tour de la Terre sur une orbite polaire, ne demeure pas exactement dans un plan figé par rapport au reste de l'Univers, mais que la rotation de la Terre entraîne un tout petit peu ce plan dans une direction donnée. Cet effet, également appelé *entraînement de référentiel*, survient parce que la Terre dans l'espace vide se comporte comme une balle en rotation dans un matelas de mousse. Quand une balle ou une coquille tourne dans la mousse, elle entraîne

* Bien que l'ordre des auteurs soit Lense puis Thirring, on a coutume (mais cela ne fait pas l'unanimité) d'insister sur l'idée de Hans Thirring en le plaçant en premier.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 57 Les satellites LAGEOS : des sphères métalliques d'un diamètre de 60 cm, d'une masse de 407 kg, recouvertes de 426 rétro-réflecteurs. (NASA)

partiellement la mousse située près d'elle. De même, la Terre entraîne le vide avec elle, et fait donc tourner le plan d'oscillation du pendule. Pour la même raison, la rotation de la Terre fait tourner le plan de l'orbite d'un satellite.

L'effet Thirring–Lense, ou effet d'entraînement de référentiel, est extrêmement ténu. Il fut mesuré pour la première fois en 1998 par un groupe italien dirigé par Ignazio Ciufolini, et une nouvelle fois par la même équipe dans les années qui précédèrent 2004. Ils surveillèrent le mouvement de deux satellites artificiels spécifiquement conçus – dont l'un est indiqué dans la Figure 57 – constitués uniquement d'un corps en acier muni de quelques réflecteurs. Le groupe mesura le mouvement de chaque satellite autour de la Terre avec une très haute résolution, en faisant usage de pulsations laser réfléchies. Cette méthode permit à cette expérience à faible coût de devancer de plusieurs années les ef-
Réf. 125 forts d'autres groupes beaucoup plus importants mais aussi beaucoup moins réactifs*. Les résultats confirmèrent les prédictions de la relativité générale avec une approximation d'environ 25 %.

Les effets d'entraînement de référentiel ont également été mesurés dans des systèmes d'étoiles binaires. Cela est possible lorsque l'une des étoiles est un pulsar, parce que de tels astres envoient des signaux radio réguliers, par exemple chaque milliseconde, avec une précision de métronome. En mesurant l'instant précis où le signal arrive sur Terre, nous pouvons déduire de quelle manière ces étoiles se déplacent et confirmer que des
Réf. 126 effets aussi subtils que l'entraînement de référentiel se produisent réellement.

Gravitomagnétisme**

L'effet d'entraînement de référentiel et l'effet Thirring–Lense peuvent être vus comme des cas particuliers de gravitomagnétisme. (Nous ferons ressortir cette correspondance plus loin.) Cette approche de la gravitation, déjà étudiée au cours du dix-neuvième siècle
Réf. 127 par Holzmüller et par Tisserand, est à nouveau devenue populaire ces dernières années, particulièrement pour ses qualités pédagogiques. Comme nous l'avons mentionné, le fait de parler de *champ* gravitationnel représente toujours une approximation. Dans le cas d'une faible gravité, comme cela se passe dans la vie quotidienne, cette approximation est excellente. De nombreux effets relativistes peuvent être décrits en termes de champ gravitationnel, sans faire usage du concept de courbure de l'espace ou du tenseur métrique. Au

* L'une d'entre elles est la mission du satellite Gravity Probe B, qui devrait accroître de manière significative la précision des mesures. Le satellite fut mis en orbite polaire en 2004, après 30 années d'études.
** Cette section peut être sautée en première lecture.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lieu de décrire complètement le matelas de l'espace-temps, le modèle du champ gravitationnel ne traite que des écarts du matelas par rapport à l'espace-temps plat, en stipulant que cet écart représente une entité distincte, appelée champ gravitationnel. Mais quelle est la manière relativistiquement correcte de décrire le champ gravitationnel ?

Nous pouvons comparer cette situation à l'électromagnétisme. Dans une description relativiste de l'électrodynamique, le champ électromagnétique possède une composante électrique et une composante magnétique. Le champ électrique est responsable de la force de Coulomb en l'inverse du carré. De la même manière, dans une description relativiste de la gravitation (faible)*, le champ gravitationnel possède une composante gravitoélectrique et une composante gravitomagnétique. Le champ gravitoélectrique est responsable de l'accélération en l'inverse du carré de la gravitation ; ce que nous appelons le champ gravitationnel dans la vie quotidienne est la partie gravitoélectrique du champ gravitationnel relativiste complet.

Page 40

Dans la nature, toutes les composantes du tenseur énergie–impulsion produisent des effets gravitationnels. Autrement dit, ce ne sont pas seulement la masse et l'énergie qui engendrent un champ, mais également les *déplacements* (ou *courants*) de masse ou d'énergie. Ce dernier cas est baptisé gravitomagnétisme (ou entraînement de référentiel). Cette dénomination est due à l'analogie qui existe avec l'électrodynamique, dans laquelle ce n'est pas uniquement la densité de charge qui produit un champ (le champ électrique), mais également le déplacement des charges** (le champ magnétique).

Dans le cas de l'électromagnétisme, la distinction entre le champ magnétique et le champ électrique dépend de l'observateur, chacun des deux pouvant (en partie) être transformé en l'autre. La gravitation est exactement similaire. L'électromagnétisme fournit une excellente indication sur la manière dont les deux types de champs gravitationnels se comportent, cette intuition peut être directement transposée à la gravitation. En électrodynamique, le mouvement $\mathbf{x}(t)$ d'une particule chargée est décrit par l'équation de Lorentz

Réf. 128

Page 23

$$m\ddot{\mathbf{x}} = q\mathbf{E} - q\dot{\mathbf{x}} \wedge \mathbf{B} \,. \tag{150}$$

En d'autres termes, les champs électriques $\mathbf{E}$ agissent sur la variation de la *vitesse*, tandis que les champs magnétiques $\mathbf{B}$ contribuent à une variation, en fonction de la grandeur de la vitesse, de la *direction* de cette vitesse, sans faire varier sa grandeur elle-même. Ces deux modifications dépendent de la valeur de la charge q. Dans le cas de la gravitation, cette expression devient

$$m\ddot{\mathbf{x}} = m\mathbf{G} - m\dot{\mathbf{x}} \wedge \mathbf{H} \,. \tag{151}$$

Le rôle de la charge est campé par la masse. Dans cette expression, nous connaissons déjà le champ $\mathbf{G}$, donné par

$$\mathbf{G} = \nabla\varphi = \nabla\frac{GM}{r} = -\frac{GM\mathbf{x}}{r^3} \,. \tag{152}$$

Comme d'habitude, la quantité φ représente le potentiel (scalaire). Le champ $\mathbf{G}$ est le champ gravitationnel usuel de la gravitation universelle, produit par chaque masse, et

* Cette approximation requiert que les vitesses soient faibles, les champs faibles, et les distributions de masse–énergie stationnaires et localisées.

** Ce qu'on appelle plus couramment le *courant électrique*. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

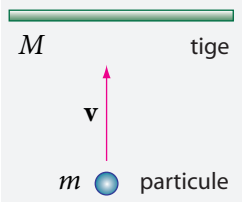


FIGURE 58 La réalité du gravitomagnétisme.

dans ce contexte il est appelé le *champ gravitoélectrique*. Sa dimension est celle d'une accélération. Les masses sont les sources du champ gravitoélectrique. Celui-ci vérifie $\Delta\mathbf{G} = -4\pi G\rho$, où ρ représente la masse volumique. Un champ $\mathbf{G}$ *statique* n'a aucun mouvement de rotation, il vérifie $\Delta \wedge \mathbf{G} = 0$.

Il n'est pas difficile de montrer que si des champs gravito*électriques* existent, alors
Réf. 129 des champs gravito*magnétiques* doivent également être rencontrés. Ces derniers apparaissent à chaque fois que nous changeons de point de vue, d'un observateur au repos
Page 40 à un autre en mouvement. (Nous utiliserons le même argument en électrodynamique.) Une particule qui chute perpendiculairement en direction d'une tige de longueur infinie illustre cette idée, comme indiqué sur la Figure 58. Un observateur au repos par rapport à la tige peut décrire toute la situation à l'aide uniquement des forces gravitoélectriques. Un deuxième observateur, se déplaçant le long de la tige à vitesse constante, observe que la quantité de mouvement de la particule *le long de la tige* augmente aussi. Il ne mesurera donc pas seulement un champ gravitoélectrique, il mesurera aussi un champ gravitomagnétique. En réalité, une masse se déplaçant à une vitesse $\mathbf{v}$ engendre
Défi 213 pe une (tri-)accélération gravitomagnétique, sur une masse de référence m, donnée par

$$m\mathbf{a} = -m\mathbf{v} \wedge \mathbf{H} \tag{153}$$

où, *presque* comme en électrodynamique, le *champ gravitomagnétique* statique $\mathbf{H}$ vérifie

$$\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{A} = 16\pi N\rho\mathbf{v}\,, \tag{154}$$

ici, ρ est la masse volumique de la source du champ et N est une constante de proportionnalité. La quantité $\mathbf{A}$ est appelée le *potentiel vecteur gravitomagnétique*. Dans la nature, il n'existe aucune source pour le champ gravitomagnétique, celui-ci obéit donc à la relation $\nabla\mathbf{H} = 0$. Le champ gravitomagnétique possède la dimension de l'inverse du temps, comme une vitesse angulaire.

Défi 214 pe Lorsque la situation de la Figure 58 est quantifiée, nous trouvons que la constante de proportionnalité N est donnée par

$$N = \frac{G}{c^2} = 7{,}4 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m/kg}\,, \tag{155}$$

soit une valeur extrêmement faible. Nous découvrons alors que, comme dans le cas de l'électrodynamique, le champ gravitomagnétique est plus faible que le champ gravitoélectrique d'un facteur c^2. Il est donc très délicat de l'observer. De plus, un deuxième aspect

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

rend l'observation du gravitomagnétisme encore plus ardue. Contrairement à l'électromagnétisme, dans le cas de la gravitation il n'existe aucune façon d'observer des champs
Défi 215 s gravitomagnétiques *purs* (pourquoi ?). Ils sont toujours combinés avec les champs gravitoélectriques, plus communs. Pour ces raisons, les effets gravitomagnétiques ne furent mesurés pour la première fois que dans les années 1990. Nous remarquons que la gravitation universelle constitue l'approximation de la relativité générale lorsque tous les effets gravitomagnétiques sont ignorés.

En résumé, *si une masse se déplace, elle engendre également un champ gravitomagnétique*. Comment pouvons-nous imaginer le gravitomagnétisme ? Jetons un œil sur ses effets. L'expérience de la Figure 58 a montré qu'une tige en mouvement a pour effet d'accélérer délicatement une masse de référence dans la même direction. Dans notre métaphore du vide comme étant un matelas, il apparaît que si une tige en mouvement entraîne le vide dans sa course, il en sera de même pour toute masse observée dans cette zone. Le gravitomagnétisme peut donc être perçu comme étant un effet de l'entraînement de l'espace vide. À cause d'une réticence répandue à imaginer le vide comme étant un matelas, l'expression *entraînement de référentiel* est utilisée à la place.

Dans cette description, *tous les effets d'entraînement de référentiel sont des effets gravitomagnétiques*. En particulier, un champ gravitomagnétique apparaît aussi lorsqu'une grosse masse *tourne*, comme dans l'effet Thirring–Lense de la Figure 56. Pour un moment cinétique **J**, le champ gravitomagnétique **H** est un champ dipolaire, qui est exprimé par

$$\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{h} = \nabla \wedge \left(-2 \frac{\mathbf{J} \wedge \mathbf{x}}{r^3} \right) \tag{156}$$

exactement comme dans le cas de l'électrodynamique. Le champ gravitomagnétique qui règne autour d'une masse en rotation possède trois implications majeures.

En premier lieu, comme en électromagnétisme, une particule observée en rotation avec un moment cinétique **S** ressent un *couple* si elle se trouve près d'une grosse masse en rotation ayant un moment cinétique **J**. Ce couple **T** est donné par

$$\mathbf{T} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{S}}{\mathrm{d}t} = \tfrac{1}{2}\, \mathbf{S} \wedge \mathbf{H} \,. \tag{157}$$

Ce couple provoque la précession des gyroscopes. Pour la Terre, cet effet est extrêmement petit : au pôle Nord, cette précession a un angle conique de 0,6 milliseconde d'arc et une période de rotation de l'ordre de 10^{-10} fois celle de la Terre.

Puisque pour le couple nous avons $\mathbf{T} = \dot{\mathbf{\Omega}} \wedge \mathbf{S}$, le champ dipolaire d'une grosse masse en rotation ayant un moment cinétique **J** conduit à un deuxième effet. Une masse en orbite subira une précession de son plan orbital. Observée à partir d'une position située
Défi 216 pe à l'infini, nous obtenons pour une orbite de demi-grand axe a et d'excentricité e,

$$\dot{\mathbf{\Omega}} = -\frac{\mathbf{H}}{2} = -\frac{G}{c^2}\frac{\mathbf{J}}{|\mathbf{x}|^3} + \frac{G}{c^2}\frac{3(\mathbf{J}\mathbf{x})\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|^5} = \frac{G}{c^2}\frac{2\mathbf{J}}{a^3(1-e^2)^{3/2}} \,, \tag{158}$$

ce qui constitue la prédiction de Lense et Thirring*. Cet effet est une nouvelle fois extrê-

Défi 217 pe * Une sphère homogène en rotation possède un moment cinétique exprimé comme suit : $J = \frac{2}{5} M\omega R^2$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mement ténu, engendrant une variation de seulement 8″ par révolution pour un satellite situé à proximité de la surface de la Terre. Malgré cette valeur modique et un grand nombre d'effets plus importants qui la perturbent, l'équipe de Ciufolini est parvenue à confirmer ce résultat. Réf. 125

En conséquence du troisième effet du gravitomagnétisme, une masse en rotation entraîne une précession du périastre. C'est un effet analogue à celui produit par la courbure spatiale sur des masses en orbite, même si le corps central ne tourne pas. La rotation atténue simplement la précession due à la courbure de l'espace-temps. Cet effet a été entièrement confirmé dans le cas du célèbre pulsar binaire PSR B1913+16, découvert en 1974, ainsi que pour le « véritable » pulsar double* PSR J0737-3039, découvert en 2003. Ce dernier exhibe une précession de son périastre de 16,9°/a, la plus grande valeur observée jusqu'à présent. Réf. 130

Le fossé qui sépare les effets gravitoélectriques des effets gravitomagnétiques est donc utile pour réaliser une approximation pertinente de la description de la gravité. Cela nous permet également de répondre à des questions telles que : comment la gravité peut-elle maintenir la Terre en orbite autour du Soleil, si elle met 8 minutes pour voyager du Soleil jusqu'à nous ? Pour découvrir la réponse, il s'avère très utile de réfléchir en s'aidant de l'analogie de l'électromagnétisme. De plus, la séparation du champ gravitationnel en composantes gravitoélectrique et gravitomagnétique nous permet de brosser une description simple des ondes gravitationnelles. Défi 218 pe

Ondes gravitationnelles

L'une des prédictions les plus fantastiques de la physique concerne l'existence des ondes gravitationnelles. Les ondes de gravité** démontrent que l'espace vide lui-même possède l'aptitude à se déplacer et à vibrer. L'idée de base est élémentaire. Puisque l'espace est flexible, tel ce vaste matelas dans lequel nous vivons, il devrait être capable d'osciller sous la forme d'ondes de propagation, exactement comme un matelas ou n'importe quel autre milieu élastique.

TABLEAU 3 L'éventail attendu des ondes gravitationnelles.

Fréquence	Longueur d'onde	Nom	Phénomène prévu
$< 10^{-4}$ Hz	> 3 Tm	fréquences extrêmement basses	systèmes d'étoiles binaires lentes, trous noirs supermassifs
10^{-4} Hz–10^{-1} Hz	3 Tm–3 Gm	fréquences très basses	systèmes d'étoiles binaires rapides, trous noirs massifs, oscillations de naines blanches

* Le terme de « pulsar double » ne doit pas être confondu avec celui de « pulsar binaire », dont seulement l'une des deux composantes est identifiée comme étant un pulsar. [N.D.T.]

** En toute rigueur, l'expression « onde de gravité » possède une signification particulière : les *ondes de gravité* sont les ondes de surface de l'océan, où la gravité est la force de rétablissement. Cependant, en relativité générale, cette expression est employée de façon interchangeable avec « onde gravitationnelle ».

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Fréquence	Longueur d'onde	Nom	Phénomène prévu
10^{-1} Hz–10^{2} Hz	3 Gm–3 Mm	basses fréquences	pulsars binaires, trous noirs moyens et légers
10^{2} Hz–10^{5} Hz	3 Mm–3 km	fréquences moyennes	supernovae, oscillations de pulsars
10^{5} Hz–10^{8} Hz	3 km–3 m	hautes fréquences	inconnu, peut-être des sources futures anthropiques
> 10^{8} Hz	< 3 m		peut-être des sources cosmologiques inconnues

Réf. 131 Jørgen Kalckar et Ole Ulfbeck ont développé un argument simple pour justifier la nécessité des ondes gravitationnelles, fondé sur la réalité d'une vitesse maximale. Ils étudièrent deux masses identiques chutant l'une vers l'autre sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, et imaginèrent la présence d'un ressort situé entre elles. Un tel ressort fera rebondir les masses l'une contre l'autre, puis elles chuteront à nouveau, et ainsi de suite. Le ressort central emmagasine l'énergie cinétique des masses en question. La valeur de l'énergie peut être mesurée en déterminant de quelle longueur le ressort est comprimé. Lorsque ce ressort se détend à nouveau et projette les masses en arrière dans l'espace, l'attraction gravitationnelle fera graduellement ralentir celles-ci, jusqu'à ce qu'elles tombent à nouveau l'une vers l'autre, entamant donc un nouveau cycle identique.

Néanmoins, l'énergie stockée dans le ressort doit diminuer à chaque cycle. Dès qu'une sphère se détache du ressort, elle est décélérée par la traction gravitationnelle que l'autre sphère exerce. Maintenant, la valeur de ce ralentissement dépend de la distance à l'autre masse, mais, puisqu'il existe une vitesse maximale de propagation, la décélération effective est fonction de la distance où l'autre masse *était* lorsque sa gravité s'est mise effectivement en route en direction de la seconde masse. Pour deux masses s'éloignant l'une de l'autre, la distance effective est donc légèrement inférieure à la véritable distance. En bref, tout au long de l'éloignement, la véritable décélération est *plus importante* que celle calculée en ne tenant pas compte du délai de propagation.

De façon similaire, lorsqu'une masse retombe vers l'autre, elle est accélérée par cette autre masse en fonction de la distance où elle était quand la gravité effective a commencé à se déplacer dans sa direction. Par conséquent, tout en s'approchant, l'accélération est *plus faible* que celle calculée sans ce décalage temporel.

Par conséquent, les masses reviennent avec une énergie *inférieure* à celle qu'elles avaient avant de s'en aller. À chaque rebond, le ressort est un peu moins comprimé. La différence entre ces deux énergies est perdue par chaque masse : elle est prélevée par l'espace-temps ; en d'autres termes, elle est diffusée en tant que rayonnement gravitationnel. La même chose se produit avec les matelas. Rappelez-vous qu'une masse déforme l'espace autour d'elle de même qu'une boule métallique posée sur un matelas déforme la surface autour d'elle. (Toutefois, contrairement aux véritables matelas, il n'y a aucun frottement entre la boule et le matelas.) Si deux boules métalliques se cognent à plusieurs reprises l'une contre l'autre puis s'éloignent alors, jusqu'à ce qu'elles reviennent à nouveau ensemble, elles émettront des ondes de surface sur le matelas. Au cours du temps,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

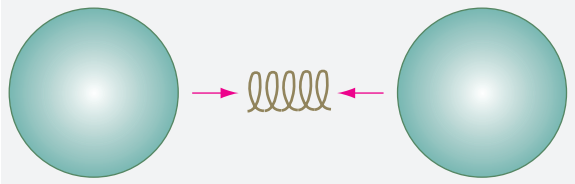


FIGURE 59 Une expérience de pensée démontrant l'existence nécessaire des ondes gravitationnelles.

cet effet réduira la distance à laquelle les deux boules s'écartent l'une de l'autre après chaque heurt. Comme nous le verrons bientôt, un effet similaire a déjà été mesuré, où les deux masses, au lieu d'être repoussées par un ressort, étaient en train de graviter l'une autour de l'autre.

Réf. 132 Une description mathématique simple des ondes de gravité découle de la séparation entre les effets gravitomagnétiques et gravitoélectriques. Il n'est pas besoin de faire beaucoup d'efforts pour étendre la gravitomagnétostatique et la gravitoélectrostatique à la *gravitodynamique*. De même que l'électrodynamique peut être déduite de l'attraction de Coulomb lorsque nous commutons vers d'autres observateurs inertiels, la gravitodynaDéfi 219 pe mique peut être déduite de la gravitation universelle. Nous obtenons les quatre équations

$$\nabla \mathbf{G} = -4\pi G\rho \quad , \quad \nabla \wedge \mathbf{G} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$
$$\nabla \mathbf{H} = 0 \quad , \quad \nabla \wedge \mathbf{H} = -16\pi G\rho\mathbf{v} + \frac{N}{G}\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial t} \,. \tag{159}$$

Nous avons déjà rencontré deux de ces équations. Les deux autres sont des versions étendues de ce que nous avons vu, prenant en compte la dépendance temporelle. Mis à part un facteur de 16 au lieu de 4 dans la dernière équation, ces équations pour la gravitodynamique sont les mêmes que les équations de Maxwell pour l'électrodynamique*. Ces équations possèdent une propriété élémentaire : dans le vide, nous pouvons déduire de celles-ci une *équation d'onde* pour les champs gravitoélectrique et gravitomagnétique **G** Défi 220 pe et **H**. (Ce n'est pas difficile : essayez !) En d'autres termes, *la gravité peut se comporter comme une onde : la gravité peut rayonner*. Tout cela découle de l'expression de la gravitation universelle lorsqu'elle est appliquée à des observateurs en mouvement, en exigeant que ni les observateurs ni l'énergie ne puissent se déplacer plus vite que c. L'argument présenté ci-dessus concernant le ressort et le présent argument mathématique utilisent tous les deux les mêmes hypothèses et parviennent à la même conclusion.

* Le facteur supplémentaire souligne le fait que le rapport entre le moment cinétique et l'énergie (le « spin ») des ondes gravitationnelles est différent de celui des ondes électromagnétiques. Les ondes de gravité ont un spin égal à 2, alors que les ondes électromagnétiques ont un spin de 1. Remarquez que, puisque la gravitation est universelle, il ne peut exister qu'*une seule* sorte de particule de rayonnement de spin 2 dans la nature. C'est en contradiction flagrante avec le cas du spin 1, dont il existe plusieurs exemplaires dans la nature.

Par ailleurs, le spin de rayonnement est une propriété *classique*. Le *spin d'une onde* est le rapport $E/L\omega$, où E est l'énergie, L le moment cinétique, et ω la fréquence angulaire. Pour des ondes électromagnétiques, ce rapport est égal à 1, pour des ondes gravitationnelles, il est de 2.

Réf. 133 Remarquez que, à cause de l'approximation à la base des équations de la gravitodynamique, ces équations ne sont *ni* des invariants de jauge *ni* covariantes en général.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

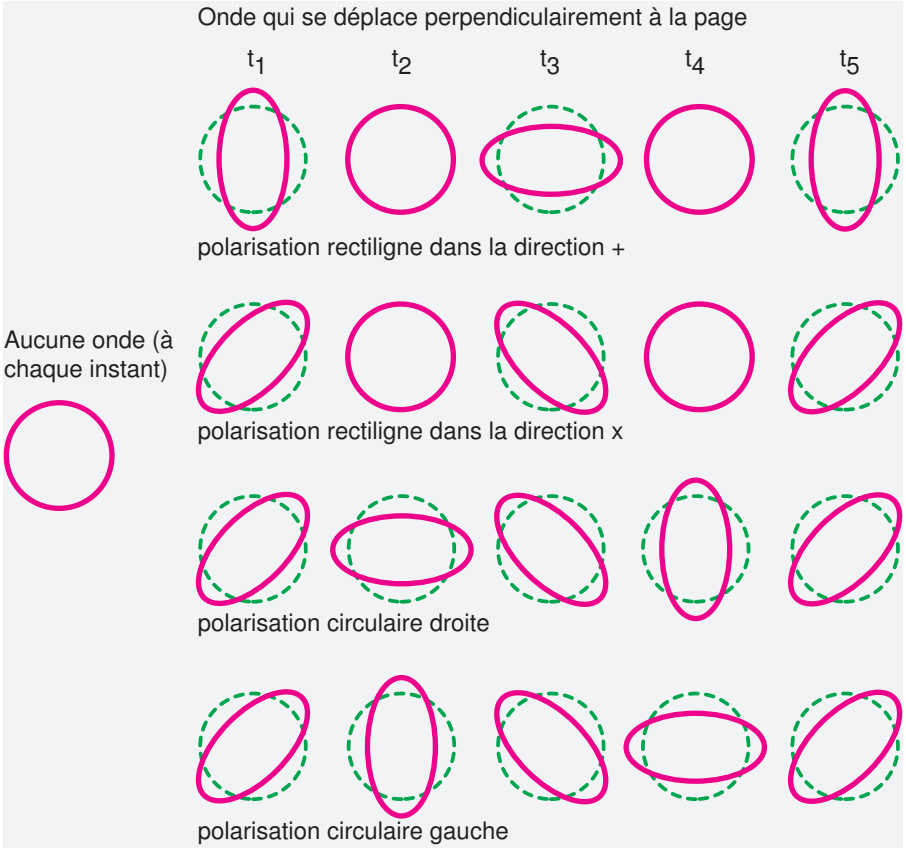


FIGURE 60 Effets exercés sur un corps circulaire ou sphérique, dus à une onde plane gravitationnelle se déplaçant dans une direction perpendiculaire à la page.

Quelques manipulations nous indiquent que la vitesse de ces ondes est déterminée par

Défi 221 e

$$c = \sqrt{\frac{G}{N}} \,. \tag{160}$$

Page 78 Ce résultat correspond à l'équivalent électromagnétique

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \,. \tag{161}$$

La même lettre a été utilisée pour désigner les deux vitesses, puisqu'elles sont identiques. Ces deux influences se propagent avec la vitesse commune à toute énergie dépourvue de masse au repos. (Nous remarquons que c'est, à proprement parler, une prédiction : la vitesse des ondes gravitationnelles n'a pas encore été mesurée. Il s'est avéré qu'en 2003 certains ont prétendu, à tort, l'avoir fait.)

Réf. 134

Réf. 136 Comment pourrions-nous imaginer ces ondes ? Nous avons affirmé plus haut avec insouciance qu'une onde gravitationnelle correspondait à une onde de surface sur un

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

matelas. Maintenant, nous devons faire mieux et imaginer que nous vivons *à l'intérieur* du matelas. Les ondes gravitationnelles représentent donc des déformations mouvantes et oscillantes du matelas, c'est-à-dire de l'espace. Comme les ondes du matelas, il apparaît que les ondes de gravité sont *transversales*. Elles peuvent donc être polarisées. (Les ondes de surface sur le matelas ne le peuvent pas, parce qu'en deux dimensions il n'y a pas de polarisation possible.) Les ondes gravitationnelles peuvent être polarisées de deux manières indépendantes. Les effets d'une onde gravitationnelle sont indiqués sur la Figure 60, à la fois pour des polarisations rectiligne et circulaire*. Nous remarquons que les ondes sont invariantes par une rotation d'angle π et que les deux polarisations rectilignes diffèrent d'un angle $\pi/4$. Cela montre que les particules associées à ces ondes, les gravitons, ont un spin égal à 2. (En général, le champ de rayonnement classique pour une particule de spin S est invariant par une rotation d'angle $2\pi/S$. De plus, les deux composantes orthogonales de la polarisation rectiligne d'une particule de spin S forment un angle de $\pi/2S$. Pour le photon, par exemple, le spin est de 1. En réalité, son angle de rotation invariant est 2π et l'angle formé par les deux polarisations est $\pi/2$.)

Si nous schématisons le vide comme un matelas qui *emplit* l'espace, les ondes gravitationnelles sont des déformations fluctuantes de ce matelas. Plus précisément, la Figure 60 montre qu'une onde de polarisation circulaire possède les mêmes propriétés qu'un tire-bouchon progressant à travers ce matelas. Nous découvrirons plus tard pourquoi l'analogie entre un tire-bouchon et une onde de gravité de polarisation circulaire fonctionne si bien. En réalité, dans la dernière partie, nous mettrons la main sur un modèle particulier de la substance du matelas de l'espace-temps qui incorpore automatiquement des ondes en tire-bouchon (à la place des ondes de spin 1 générées par des matelas ordinaires en latex).

Comment engendrons-nous des ondes gravitationnelles ? Évidemment, des masses

* Une onde de gravité plane (de faible amplitude) se propageant dans la direction des z est décrite par une métrique g donnée par

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1+h_{xx} & h_{xy} & 0 \\ 0 & h_{xy} & -1+h_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{162}$$

où ses deux composantes, dont le rapport des amplitudes détermine la polarisation, sont exprimées par

$$h_{ab} = B_{ab} \sin(kz - \omega t + \varphi_{ab}) \tag{163}$$

comme dans toute onde harmonique plane. Les amplitudes B_{ab}, la fréquence ω et la phase φ sont déterminées par le système physique en particulier. La relation de dispersion générale, pour le nombre d'onde k, issue de l'équation d'onde est

$$\frac{\omega}{k} = c \tag{164}$$

et montre ainsi que l'onde se déplace à la vitesse de la lumière.

Dans une autre jauge, une onde plane peut être écrite comme

$$g = \begin{pmatrix} c^2(1+2\varphi) & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & -1+2\varphi & h_{xy} & 0 \\ A_2 & h_{xy} & -1+h_{xx} & 0 \\ A_3 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{165}$$

où φ et $\mathbf{A}$ représentent les potentiels tels que $\mathbf{G} = \nabla\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{c\partial t}$ et $\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{A}$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

doivent être accélérées. Mais comment, précisément ? La conservation de l'énergie interdit à des distributions de masses monopolaires (des monopôles) de voir leurs potentiels énergétiques varier. Nous savons également par la gravitation universelle qu'une masse sphérique dont le rayon oscille ne devrait pas émettre des ondes gravitationnelles. De plus, la conservation de la quantité de mouvement empêche les distributions de masses
Défi 222 pe dipolaires (les dipôles) d'être variables.

Par conséquent, seuls les *quadrupôles variables* peuvent émettre des ondes*. Par exemple, deux masses en orbite l'une autour de l'autre émettront des ondes gravitationnelles. De même, n'importe quel objet en rotation qui ne possède pas une symétrie cylindrique autour de son axe de rotation en fera de même. Ainsi, le simple fait de faire tourner son bras conduit à l'émission d'ondes gravitationnelles. La plupart de ces affirmations s'appliquent également à des masses situées dans un matelas. Pouvez-vous
Défi 223 pe indiquer quelles en sont les différences ?

Einstein remarqua que l'amplitude h d'ondes situées à une distance r d'une source est donnée, en bonne approximation, par la dérivée seconde du moment quadrupolaire
Réf. 135 retardé Q :

$$h_{ab} = \frac{2G}{c^4}\frac{1}{r}\mathrm{d}_{tt}Q^{\mathrm{ret}}_{ab} = \frac{2G}{c^4}\frac{1}{r}\mathrm{d}_{tt}Q_{ab}(t - r/c) \,. \tag{166}$$

Cette expression montre que l'amplitude des ondes de gravité *décroît uniquement en* $1/r$, contrairement aux attentes naïves. Cependant, cette caractéristique est la même que pour les ondes électromagnétiques. De plus, la valeur minuscule du premier facteur, $1{,}6 \cdot 10^{-44}$ Wm/s, indique que des systèmes vraiment gigantesques sont nécessaires pour produire des variations du moment quadrupolaire qui puissent entraîner une fluctuation décelable de la longueur des corps. Pour vous en convaincre, remplacez simplement les
Défi 224 pe lettres par quelques nombres, en gardant à l'esprit que les meilleurs détecteurs actuels sont capables de mesurer des variations de longueur allant jusqu'à $h = \delta l/l = 10^{-19}$. La création d'ondes gravitationnelles détectables par les êtres humains est probablement impossible.

Les ondes gravitationnelles, comme toutes les autres ondes, transportent de l'énergie**. Si nous appliquons la formule générale de la puissance émise P au cas de deux masses m_1 et m_2 en orbite circulaire l'une autour de l'autre à une distance l, nous
Réf. 96 obtenons

$$P = -\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \frac{G}{45c^5}\dddot{Q}^{\mathrm{ret}}_{ab}\dddot{Q}^{\mathrm{ret}}_{ab} = \frac{32}{5}\frac{G}{c^5}\left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)^2 l^4\omega^6 \tag{167}$$

ce qui, en utilisant la relation de Kepler $4\pi^2 r^3/T^2 = G(m_1 + m_2)$, devient

$$P = \frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5}\frac{(m_1 m_2)^2(m_1 + m_2)}{l^5} \,. \tag{168}$$

* Un *quadrupôle* est une disposition symétrique, sur les *quatre* côtés d'un carré, de quatre pôles alternatifs. Dans la gravitation, un monopôle est représenté par une masse ponctuelle ou deux masses sphériques, et, puisque les masses ne peuvent pas être négatives, un quadrupôle est formé par *deux* monopôles. Une sphère aplatie, telle la Terre, peut être approchée par l'addition d'un monopôle et d'un quadrupôle. La même chose reste valable pour une sphère allongée.

Page 61 ** Le gravitomagnétisme et la gravitoélectricité nous permettent de définir un vecteur de Poynting gravita-
Réf. 129 tionnel. Il est aussi aisé à définir et à utiliser que dans le cas de l'électrodynamique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

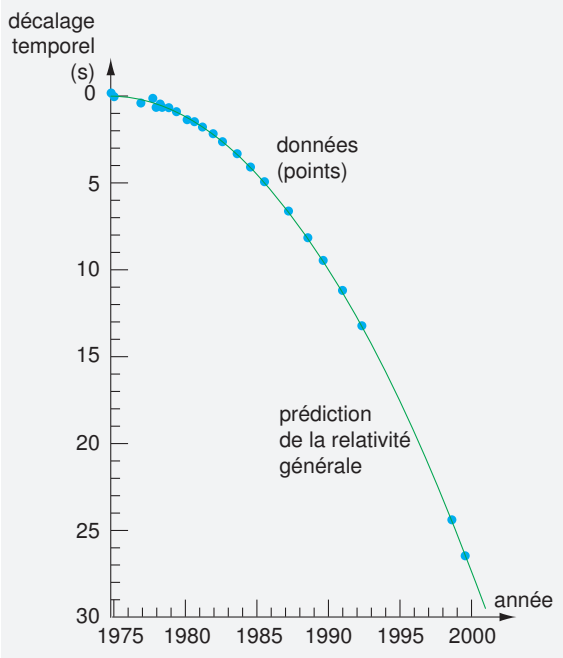


FIGURE 61 Comparaison entre le retard temporel mesuré du périastre du pulsar binaire PSR 1913+16 et la prédiction due à la perte d'énergie par rayonnement gravitationnel.

Pour des orbites elliptiques, la proportion augmente avec l'ellipticité, comme l'explique Réf. 96 Goenner. En insérant les valeurs propres au cas de la Terre et du Soleil, nous obtenons une puissance d'environ 200 W, et une valeur de 400 W pour le système Jupiter–Soleil. Ces grandeurs sont si petites que leurs effets ne peuvent pas du tout être décelés.

Pour tous les systèmes qui gravitent, la fréquence des ondes est le double de la fré- Défi 225 pe quence orbitale, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Ces basses fréquences font qu'il est encore plus difficile de les détecter.

Par conséquent, la seule observation possible des effets des ondes gravitationnelles se trouve pour le moment dans les pulsars binaires. Les pulsars sont des astres petits mais prodigieusement denses : même avec une masse équivalente à celle du Soleil, leur diamètre est approximativement de 10 km seulement. En conséquence, ils peuvent graviter l'un près de l'autre à faible distance et à des vitesses considérables. En réalité, dans le système le plus connu constitué d'un pulsar binaire, PSR 1913+16, les deux astres gravitent l'un autour de l'autre en une période ahurissante de 7,8 h, bien que leur demi-grand axe soit d'environ 700 Mm, un peu moins du double de la distance Terre–Lune. Puisque leur vitesse orbitale grimpe à 400 km/s, ce système est significativement relativiste.

Les pulsars sont dotés d'une propriété très utile : à cause de leur rotation, ils émettent des pulsations radio extraordinairement régulières (d'où leur nom), souvent de l'ordre de quelques millisecondes. Par conséquent, il est facile de retrouver leur orbite en mesurant la variation du temps d'arrivée du signal. Dans une célèbre expérience, une équipe d'astrophysiciens dirigée par Joseph Taylor* mesura la décroissance de la vitesse du pul- Réf. 137 sar binaire déjà cité. Après avoir écarté tous les autres effets et collecté les données du-

* Il partagea le prix Nobel de physique en 1993 pour tout le travail effectué durant sa carrière.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

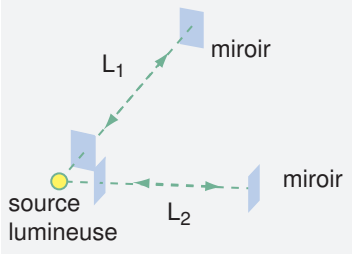


FIGURE 62 Détection d'ondes gravitationnelles.

rant vingt années, ils notèrent une diminution de la fréquence orbitale, indiquée sur la Réf. 138 Figure 61. Ce ralentissement est dû à l'émission d'ondes gravitationnelles. Le résultat s'ajuste parfaitement avec la prédiction de la relativité générale, *sans faire appel à un quelconque paramètre d'ajustement*. (Vous devriez pouvoir vérifier que cet effet doit dépendre de façon quadratique du temps.) Défi 226 pe C'est la seule fois jusqu'à présent où la relativité générale a été testée jusqu'à la précision de $(v/c)^5$. Pour se faire une idée de cette précision, considérez bien que cette expérience avait détecté une réduction du diamètre orbital Page 143 de 3,1 mm par révolution, ou de 3,5 m par an ! Les mesures furent possibles uniquement Réf. 137 parce que les deux astres qui constituent ce système sont des étoiles à neutrons de petite taille, de très grande vitesse et sous l'influence d'interactions purement gravitationnelles. La période de rotation du pulsar autour de son axe, environ 59 ms, est connue jusqu'à une précision de onze chiffres, la période orbitale de 7,8 h est connue jusqu'à dix chiffres et l'excentricité de l'orbite jusqu'à six chiffres. Réf. 96

La détection *directe* des ondes gravitationnelles constitue l'un des objectifs de la relativité générale expérimentale. La compétition est en cours depuis les années 1990. L'idée fondamentale est simple, comme l'indique la Figure 62 : prenez quatre corps, généralement quatre miroirs, pour lesquels la ligne reliant une paire est perpendiculaire à la ligne reliant l'autre paire. Mesurez alors les variations de distance de chaque paire. Si une onde gravitationnelle traverse le dispositif, une paire verra sa distance augmenter alors que l'autre diminuera, au *même* moment.

Puisque les ondes gravitationnelles détectables ne peuvent pas être produites par les hommes, la détection d'onde sollicite avant tout beaucoup de patience, pour attendre qu'une onde suffisamment puissante arrive. Deuxièmement, un système capable de détecter des variations de longueur de l'ordre de 10^{-22} ou mieux est requis – autrement dit, il faut beaucoup d'argent. Toute détection est assurée de faire la une des journaux télévisés*.

Il apparaît que, même pour un corps gravitant autour d'un trou noir, seul 6 % environ de sa masse inertielle peut être rayonnée dans l'espace sous forme d'ondes gravitationnelles. En outre, la majorité de l'énergie est diffusée pendant la chute finale dans le trou noir, de telle façon que seuls des processus plutôt violents, comme des collisions de trous noirs, sont de bons candidats de sources d'ondes de gravité décelables.

Les ondes gravitationnelles constituent un domaine d'étude captivant. Elles fournissent toujours de nombreux sujets à investiguer. Par exemple : pouvez-vous trouver

Réf. 139 * Le thème des ondes gravitationnelles est rempli d'applications potentielles pratiques. Par exemple, peut-on tirer profit des ondes de gravité pour propulser une fusée ? Oui, répondent Bonnor et Piper. Vous devriez Défi 227 pe méditer cette éventualité vous-même.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

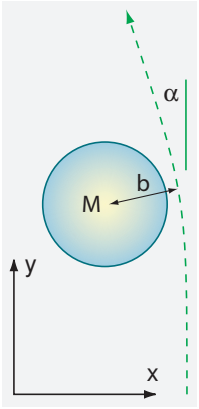


FIGURE 63 Calcul du fléchissement de la lumière par une masse.

Défi 228 r Réf. 134 une méthode pour mesurer leur vitesse ? Une fausse annonce largement diffusée est survenue en 2003. En réalité, toute mesure correcte qui n'utilise pas clairement deux détecteurs distants, du type de ceux de la Figure 62, serait une fabulation scientifique.

Pour le moment, une autre question sur les ondes gravitationnelles nous taraude : si tout changement est dû au mouvement de particules, comme l'affirmèrent les Grecs Défi 229 pe en leur temps, comment les ondes de gravité s'insèrent-elles dans cette vision ? Si les ondes gravitationnelles étaient constituées de particules, l'espace-temps devrait l'être aussi. Nous devrons patienter jusqu'au début de la dernière partie de notre ascension pour en savoir plus.

Fléchissement de la lumière et des ondes radio

Comme nous le savons d'après ce qui a été dit, la gravité influence également le mouvement de la lumière. Un observateur éloigné mesure une valeur fluctuante pour la vitesse v de la lumière près d'une masse. (Mesurée à son propre emplacement, la vitesse de la lumière est bien entendu toujours égale à c.) Il s'avère qu'un observateur éloigné mesure une vitesse *plus faible*, de telle façon que pour lui la gravité a le même effet qu'un milieu optique épais. Il suffit d'un peu de réflexion pour s'apercevoir que cet effet *augmentera* donc le fléchissement de la lumière qui passe à proximité des masses, par rapport à celui déjà déduit en 1801 par Soldner dans le cadre de la gravitation universelle.

Nous donnons dans ce qui suit une méthode simple pour calculer cet effet. Comme d'habitude, nous utilisons le système de coordonnées de l'espace-temps plat à l'infini. L'idée est de faire tous les calculs au premier ordre, puisque la valeur de la courbure est Réf. 140 très petite. L'angle de déviation α, au premier ordre, est simplement

$$\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial v}{\partial x} \mathrm{d}y \,, \tag{169}$$

où v représente la vitesse de la lumière mesurée par un observateur éloigné. (Pouvez-vous Défi 230 pe le confirmer ?) L'étape suivante consiste à se servir de la métrique de Schwarzschild

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

$$\mathrm{d}\tau^2 = (1 - \frac{2GM}{rc^2})\mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{(c^2 - \frac{2GM}{r})} - \frac{r^2}{c^2}\mathrm{d}\varphi^2 \tag{170}$$

Défi 231 pe et de la transformer en coordonnées (x, y) au premier ordre. Cela donne

$$\mathrm{d}\tau^2 = (1 - \frac{2GM}{rc^2})\mathrm{d}t^2 - (1 + \frac{2GM}{rc^2})\frac{1}{c^2}(\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2) \tag{171}$$

ce qui entraîne, une nouvelle fois, au premier ordre

$$\frac{\partial v}{\partial x} = (1 - \frac{2GM}{rc^2})c\,. \tag{172}$$

Cela confirme ce que nous savions déjà, à savoir que des observateurs éloignés observent que la lumière *ralentit* lorsqu'elle frôle une masse. Donc nous pouvons également dire que l'indice de réfraction dépend de l'altitude. En d'autres termes, une vitesse de la lumière *locale* constante conduit à un ralentissement *global*.

Défi 232 pe En glissant ce dernier résultat dans (169) et en effectuant une substitution astucieuse, nous obtenons un angle de déviation α donné par

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2}\frac{1}{b} \tag{173}$$

où la distance b représente ce que nous appelons le *paramètre d'impact* du rayon lumineux qui s'approche. L'angle de déviation α résultant est le *double* du résultat que nous avions trouvé pour la gravitation universelle. Pour un rayon situé juste au-dessus de la surface du Soleil, le résultat donne la valeur célèbre de 1,75″ qui fut confirmée par l'expédition expérimentale de 1919. (Comment mesurèrent-ils l'angle de déviation ?) Ce fut l'expérience qui rendit Einstein illustre, puisqu'elle confirma définitivement que la gravitation universelle est incorrecte. En réalité, Einstein avait eu de la chance. Deux expéditions antérieures organisées pour mesurer cette valeur avaient échoué. En 1912, il fut impossible de relever les données à cause de la pluie et, en 1914, en Crimée, les scientifiques furent arrêtés (par erreur) parce que la Première Guerre mondiale venait d'être déclenchée et qu'ils étaient soupçonnés d'être des espions. Mais, en 1911, Einstein avait déjà publié un calcul *incorrect*, indiquant seulement la valeur de Soldner, la moitié de la véritable grandeur. Ce n'est qu'en 1915, lorsqu'il acheva la relativité générale, qu'il trouva la valeur juste. Par conséquent, Einstein devint célèbre uniquement en raison de l'échec des deux expéditions qui eurent lieu avant qu'il publie le bon calcul.

Page 139
Défi 233 pe
Réf. 141
Page 139

Pour réaliser des expériences de haute précision au voisinage du Soleil, il est plus efficace de mesurer le fléchissement des ondes radio, puisqu'elles subissent moins de perturbations lorsqu'elles se propagent à travers la couronne solaire. Jusqu'ici, plus d'une douzaine d'expériences indépendantes l'ont fait, en utilisant des sources radio présentes dans le ciel, qui sont alignées avec la direction du Soleil. Elles ont confirmé la prédiction de la relativité générale à quelques pour cent près.

Réf. 118, Réf. 95
Réf. 96

Jusqu'à présent, la courbure du rayonnement a aussi été observée près de Jupiter, de certaines étoiles, de plusieurs galaxies et près des amas de galaxies. Pour la Terre, l'angle

Page 230

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est au maximum de 3 nrad, trop insignifiant pour pouvoir être mesuré, bien que cela puisse être faisable dans un proche avenir. Il existe une chance de détecter cette valeur si, comme le suggère Andrew Gould, les données du satellite Hipparcos, qui a pris des images très précises du ciel nocturne, sont dorénavant analysées de manière adéquate.

Page 173 Bien sûr, la courbure de la lumière confirme également que, dans un triangle, la somme des angles ne donne pas π (deux angles droits), comme on le prévoit *a posteriori* Défi 234 pe pour l'espace courbe. (Quel est le signe de la courbure ?)

Décalage temporel

Le calcul précédent de la courbure de la lumière à proximité des masses montre que, pour un observateur éloigné, la lumière est ralentie en s'approchant d'une masse. La vitesse de la lumière *locale* constante provoque un ralentissement de la vitesse de la lumière *globale*. Si la lumière n'était pas ralentie près d'une masse, elle irait plus vite que c pour un observateur situé près de cette masse* ! En 1964, Irwin Shapiro eut l'idée de mesurer Réf. 142 cet effet. Il proposa deux méthodes. La première consistait à envoyer des signaux radar vers Vénus, et à mesurer le temps mis pour que le signal réfléchi revienne sur Terre. Si les signaux passent près du Soleil, ils doivent être retardés. La seconde manière reposait sur l'utilisation d'un satellite artificiel communiquant avec la Terre.

Réf. 143 La première mesure, publiée en 1968, confirma directement la prédiction de la relativité générale, aux erreurs expérimentales près. Tous les tests ultérieurs de même espèce, tel celui indiqué sur la Figure 64, ont également corroboré ce pronostic, aux erreurs expérimentales près, qui sont de nos jours de l'ordre d'une partie pour mille. Le retard a Réf. 144 également été mesuré dans les pulsars binaires, puisqu'il existe certains systèmes de ce type dans le ciel pour lesquels la ligne de visée se trouve presque exactement dans le plan orbital.

Les calculs élémentaires présentés ici proposent un défi : est-il également possible de décrire *complètement* la relativité générale – donc la gravitation en champs *forts* – comme étant une variation de la vitesse de la lumière, par rapport à la position et au temps, in- Défi 236 pe duite par la masse et l'énergie ?

Conséquences sur les orbites

L'astronomie permet de réaliser des mesures précises des mouvements. Ainsi, Einstein tenta avant toutes choses d'appliquer ses résultats au mouvement des planètes. Il cherchait des décalages dans leur mouvement par rapport aux prédictions de la gravitation universelle. Einstein trouva une telle déviation : la précession du périhélie de Mercure. Cet effet est indiqué sur la Figure 65. Einstein annonça plus tard que l'instant où il s'était aperçu que ses calculs sur la précession de Mercure coïncidaient avec les observations fut l'un des moments les plus euphoriques de sa vie.

Les calculs ne sont pas compliqués. Dans la gravitation universelle, les orbites sont calculées en posant $a_{\text{grav}} = a_{\text{centri}}$; en d'autres termes, en posant $GM/r^2 = \omega^2 r$ et en

* Un admirable exercice consiste à montrer que la courbure d'une particule lente donne la valeur de Soldner, Défi 235 e vu qu'avec une vitesse croissante la valeur du fléchissement se rapproche du double de cette valeur. Dans toutes ces considérations, la rotation de la masse a été négligée. Comme l'effet de l'entraînement de référentiel le montre, la rotation modifie également la déviation de l'angle ; toutefois, dans tous les cas étudiés jusqu'à présent, cette influence reste inférieure au seuil de détection.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

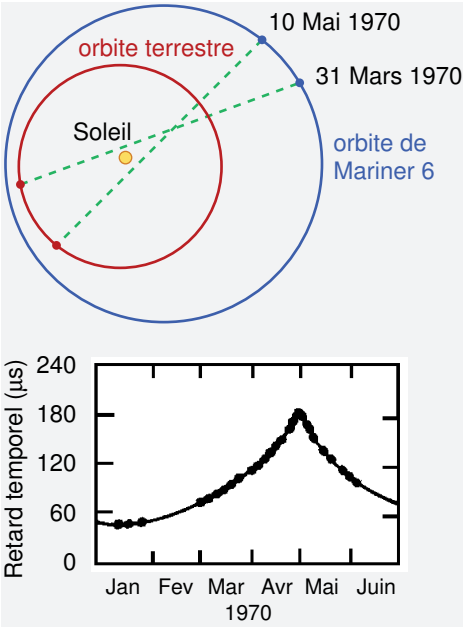


FIGURE 64 Décalage temporel dans des signaux radio – une des expériences d'Irwin Shapiro.

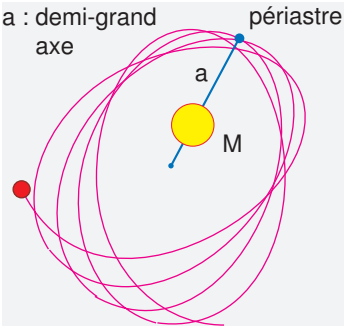


FIGURE 65 Tracé de l'orbite autour d'un corps central en relativité générale.

fixant l'énergie et le moment cinétique. La masse d'un satellite qui gravite n'apparaît donc pas explicitement.

Dans la relativité générale, nous pouvons faire disparaître la masse du satellite en orbite en effectuant un changement de variable pour l'énergie et le moment cinétique : $e = E/mc^2$ et $j = J/m$. Ensuite, la courbure de l'espace a besoin d'être intégrée. Nous utilisons la métrique de Schwarzschild (170) mentionnée plus haut pour déduire que l'état initial pour l'énergie e, associé à sa conservation, conduit à une relation entre le temps propre τ et le temps t à l'infini :

Réf. 95, Réf. 96

Page 132

Défi 237 e

$$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \frac{e}{1 - 2GM/rc^2} \,, \tag{174}$$

tandis que l'état initial pour le moment cinétique j et sa conservation impliquent que

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}\tau} = \frac{j}{r^2} \,. \tag{175}$$

Ces relations sont valables pour n'importe quelle particule, quelle que soit sa masse m. En insérant tout cela dans la métrique de Schwarzschild, nous trouvons que le mouvement d'une particule vérifie

$$\left(\frac{\mathrm{d}r}{c\mathrm{d}\tau}\right)^2 + V^2(j, r) = e^2 \tag{176}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

où le potentiel effectif V est donné par

$$V^2(J,r) = (1 - \frac{2GM}{rc^2})(1 + \frac{j^2}{r^2c^2}) \,. \tag{177}$$

Défi 238 pe Cette expression diffère légèrement de celle de la gravitation universelle, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Nous avons maintenant besoin de résoudre l'équation pour
Défi 239 e $r(\varphi)$. Pour des orbites *circulaires* nous obtenons *deux* possibilités

$$r_\pm = \frac{6GM/c^2}{1 \pm \sqrt{1 - 12(\frac{GM}{cj})^2}} \tag{178}$$

où le signe moins donne une orbite stable et le signe plus une orbite instable. Si $cj/GM < 2\sqrt{3}$, aucune orbite stable n'existe, l'objet entrera en collision avec la surface ou, pour un trou noir, sera avalé. Il existe une orbite circulaire stable *uniquement* si le moment cinétique j est supérieur à $2\sqrt{3}GM/c$. Nous découvrons donc que, dans la relativité générale, par opposition à la gravitation universelle, il y a une *plus petite* orbite circulaire stable. Le rayon de cette orbite circulaire stable minimale est $6GM/c^2 = 3R_S$.

Quelle est la situation pour des orbites *elliptiques* ? En posant $u = 1/r$ dans (176) et en dérivant, l'équation pour $u(\varphi)$ devient

$$u' + u = \frac{GM}{j^2} + \frac{3GM}{c^2}u^2 \,. \tag{179}$$

Sans la correction non linéaire située à l'extrême droite et due à la relativité générale, les
Défi 240 e solutions sont représentées par les fameuses *sections coniques*

$$u_0(\varphi) = \frac{GM}{j^2}(1 + \varepsilon\cos\varphi) \,, \tag{180}$$

c'est-à-dire des ellipses, des paraboles ou des hyperboles. Le type de section conique dépend de la valeur du paramètre ε, que nous appelons l'*excentricité*. Nous connaissons les
Page 134 formes de ces courbes grâce à la gravitation universelle. Maintenant, la relativité générale introduit le terme non linéaire dans le membre de droite de l'équation (179). Ainsi, les solutions ne sont plus des sections coniques. Toutefois, puisque la correction est minuscule,
Défi 241 e une bonne approximation en est donnée par

$$u_1(\varphi) = \frac{GM}{j^2}[1 + \varepsilon\cos(\varphi - \frac{3G^2M^2}{j^2c^2}\varphi)] \,. \tag{181}$$

Les hyperboles et paraboles de la gravitation universelle sont donc légèrement déformées. Au lieu d'avoir des orbites elliptiques, nous obtenons la célèbre trajectoire en forme de rosace indiquée sur la Figure 65. Une telle trajectoire est par-dessus tout caractérisée par une avancée du périastre. Le *périastre*, ou *périhélie* dans le cas du Soleil, est le point le plus proche du corps central que le corps gravitant puisse atteindre. Le périastre tourne

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

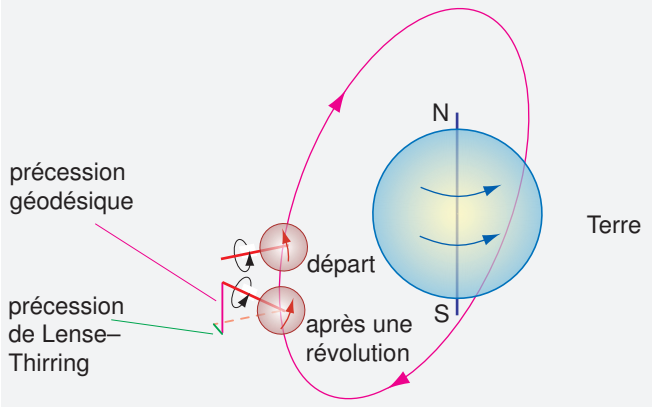


FIGURE 66 L'effet géodésique.

Défi 242 e autour du corps central d'un angle

$$\alpha \approx 6\pi \frac{GM}{a(1-\varepsilon^2)c^2} \tag{182}$$

à chaque révolution, où a est le *demi-grand axe*. Pour Mercure, cette valeur est de 43″ par siècle. Autour des années 1900, c'était le seul effet connu qui demeurait inexpliqué par la gravitation universelle. Lorsque les calculs d'Einstein le conduisirent exactement à cette valeur, il fut submergé de joie durant plusieurs jours.

Pour être certain de l'égalité entre les calculs et l'expérience, tous les autres effets conduisant aux trajectoires en forme de rosace doivent être évincés. Pendant un certain temps, on pensa que le moment quadrupolaire du Soleil pourrait être une autre origine de cet effet, mais des mesures ultérieures éliminèrent cette possibilité.

Entre-temps, l'avancée du périhélie a également été mesurée pour les orbites d'Icare, de Vénus et de Mars autour du Soleil, ainsi que pour plusieurs systèmes d'étoiles binaires. Réf. 144 Dans les pulsars binaires, l'avancée du périastre peut représenter plusieurs degrés par an. Dans tous les cas, l'expression (182) décrit correctement le mouvement aux erreurs de mesure près.

Nous remarquons que l'orbite en forme de rosace elle-même n'est pas réellement stable, à cause de l'émission d'ondes gravitationnelles. Mais, dans le Système solaire, la puissance perdue de cette manière est complètement négligeable, même au bout de Page 159 quelques milliards d'années, comme nous l'avons déjà vu ; ainsi cette trajectoire reste une excellente description des observations.

L'EFFET GÉODÉSIQUE

Lorsqu'un corps orienté gravite autour d'une masse centrale m à une distance r, la direction de la pointe ne sera plus la même après une révolution complète. Cet effet n'existe que dans la relativité générale. L'angle α décrivant la variation de la direction est donné

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

par

$$\alpha = 2\pi\left(1 - \sqrt{1 - \frac{3Gm}{rc^2}}\right) \approx \frac{3\pi Gm}{rc^2} \,. \tag{183}$$

La modification de l'angle est appelée *effet géodésique* – que l'on désigne également par effet « géodétique ». C'est une conséquence supplémentaire de la séparation entre les champs gravitoélectrique et gravitomagnétique, comme vous pouvez le montrer. Manifestement, elle n'existe pas dans la gravitation universelle.

Défi 243 e

Dans les cas où la direction dans laquelle pointe le corps gravitant est indiquée par une rotation intrinsèque, comme un satellite qui tourne comme une toupie en même temps qu'il effectue sa révolution, l'effet géodésique engendre une *précession* de cet axe. Donc cet effet est comparable au couplage spin–orbite de la théorie atomique. (L'effet Thirring–Lense cité ci-dessus est l'analogue du couplage spin–spin.)

Réf. 145

L'effet géodésique, ou précession géodésique, fut prédit par Willem de Sitter en 1916. En particulier, il proposa de détecter le changement de direction dans laquelle pointe le système Terre–Lune au cours de sa chute autour du Soleil. Cet effet est ténu : pour l'axe de la Lune, l'angle de précession est d'environ 0,019 arcsec par an. Cette incidence fut détectée pour la première fois en 1987 par une équipe italienne, pour le système Terre–Lune, par le truchement d'une astucieuse combinaison d'interférométrie radio et de disposition lunaire, en tirant profit des réflecteurs, indiqués sur la Figure 67, déposés par Lunokhod et Apollo sur la Lune. Des expériences sont également en cours pour le détecter dans des satellites artificiels.

Réf. 146

À première vue, la précession géodésique est similaire à la précession de Thomas que nous avons rencontrée dans la relativité restreinte. Dans les deux cas, un cheminement le long d'une ligne fermée provoque la perte de la direction originale. Cependant, une analyse méticuleuse montre que la précession de Thomas peut *s'ajouter* à la précession géodésique en appliquant une certaine interaction supplémentaire non gravitationnelle. Ainsi, cette analogie est bancale.

Page ??

Ceci achève notre discussion des effets de la faible gravité. Nous allons maintenant nous tourner vers la forte gravité, où la courbure ne peut pas être ignorée et où le plaisir est encore plus vif.

Curiosités et défis amusants sur les champs faibles

Défi 244 pe

Existe-t-il un champ gravitationnel statique oscillant ?

* *

Défi 245 pe

Des faisceaux concentrés d'ondes gravitationnelles, semblables aux rayons de lumière, sont-ils possibles ?

* *

Défi 246 pe

Deux faisceaux parallèles d'ondes gravitationnelles pourraient-ils s'attirer l'un vers l'autre ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

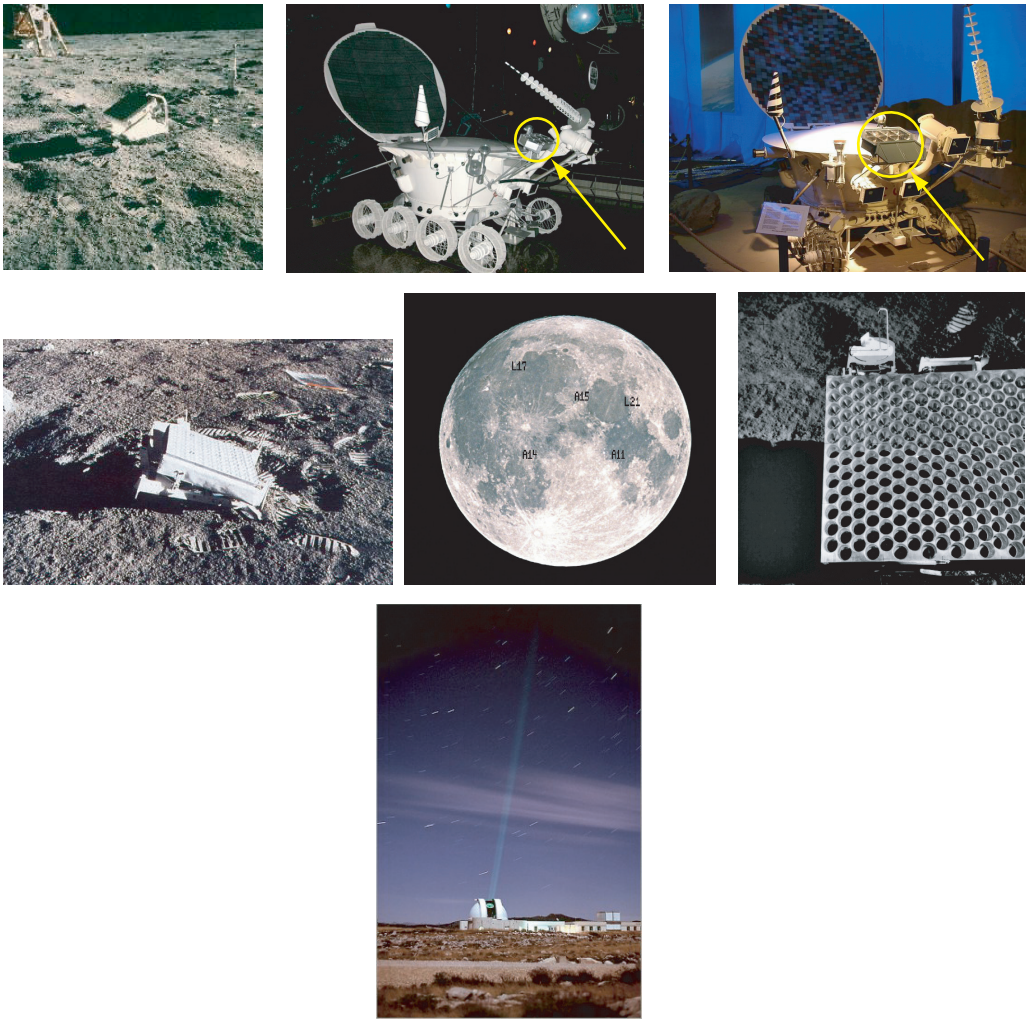


FIGURE 67 Les dispositifs rétro-réfléchissants lunaires déposés par Apollo 11 (en haut à gauche), Lunokhod (en haut au centre et à droite), Apollo 14 (au milieu à gauche) et Apollo 15 (au milieu à droite) avec leurs positions sur la Lune et un télescope réalisant une mesure de la distance. (© NASA, Observatoire de la Côte d'Azur)

COMMENT LA COURBURE EST-ELLE MESURÉE ?

Nous avons vu que dans la description précise de la gravité le mouvement dépend de la courbure de l'espace-temps. Afin de pouvoir quantifier cette idée, nous avons besoin en premier lieu de décrire la courbure elle-même aussi fidèlement que possible. Pour simplifier ce problème, nous allons commencer la discussion en deux dimensions, puis nous reviendrons aux trois et quatre dimensions.

Incontestablement, une feuille de papier plane ne possède aucune courbure. Si nous l'enroulons en cône ou en cylindre, nous obtenons ce que nous appelons une *courbure extrinsèque*. Ainsi, la feuille de papier semble toujours plane pour n'importe quel animal bidimensionnel vivant dessus – comme nous pouvons l'idéaliser par une fourmi mar-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

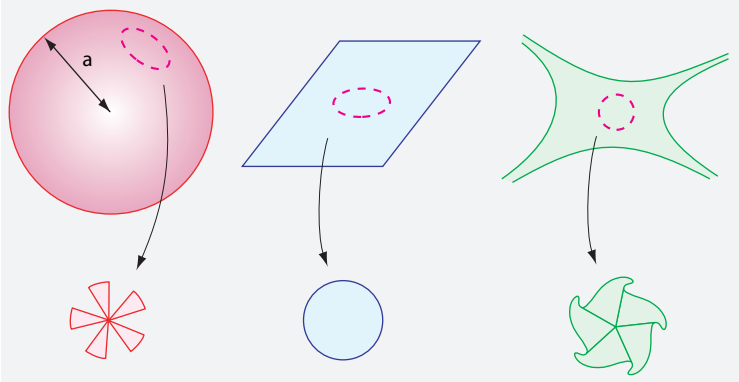


FIGURE 68 Courbure positive, nulle et négative en deux dimensions.

chant dessus. En d'autres termes, la *courbure intrinsèque* de la feuille de papier est nulle même si cette feuille tout entière est courbée extrinsèquement. (Un espace unidimensionnel peut-il avoir une courbure intrinsèque ? Un tore est-il intrinsèquement courbé ?) Défi 247 s

La courbure intrinsèque représente donc le concept clé, quantifiant la courbure qui peut être observée même par une fourmi. (Toutes les surfaces intrinsèquement courbées sont également extrinsèquement courbées.) La surface de la Terre, la surface d'une île ou les pentes d'une montagne* sont intrinsèquement courbées. À chaque fois que nous discutons de la courbure en relativité générale, nous parlons toujours de courbure *intrinsèque*, puisqu'un observateur quelconque dans la nature est par définition dans la même situation qu'une fourmi sur une surface : leurs expériences, leurs actions et leurs projets ne concernent toujours que leur voisinage immédiat dans l'espace et le temps.

Mais comment une fourmi peut-elle déterminer si elle vit sur une surface intrinsèquement courbée** ? Une méthode est indiquée sur la Figure 68. La fourmi peut contrôler si la circonférence d'un cercle ou son aire donne naissance à une relation euclidienne pour mesurer le rayon. Elle peut même utiliser la différence qui existe entre la valeur mesurée et la valeur euclidienne comme une mesure de la courbure locale intrinsèque, si elle prend comme limite des cercles infiniment petits et si elle normalise les valeurs correctes. En d'autres termes, la fourmi peut s'imaginer découper un minuscule disque autour de l'emplacement où elle se trouve, le repasser pour l'aplatir et vérifier si le disque se déchire ou se froisse. On dit qu'une surface bidimensionnelle quelconque est intrinsèquement courbée à chaque fois qu'en la repassant on ne parvient pas à produire une carte plate. La « densité » des plis ou des déchirures est reliée à la courbure.

Cela signifie que nous pouvons aussi mettre en évidence la courbure intrinsèque en examinant si deux lignes parallèles le restent lorsque leurs prolongements se rapprochent l'un de l'autre, ou lorsqu'ils s'éloignent l'un de l'autre. Dans le premier cas, telles les lignes sur un cylindre de papier, on dit que la surface possède une courbure intrinsèque *nulle* ; une surface où les parallèles se rapprochent, comme sur Terre, est dite de courbure *positive* ; et une surface où les parallèles s'éloignent, comme sur une selle, est dite de cour-

Défi 248 e

* À moins que la montagne ait la forme d'un cône parfait. Pouvez-vous le confirmer ?

** Remarquez que la solution à cette question nous indique également comment distinguer une véritable courbure des systèmes de coordonnées courbes attachés à un espace plat. Cette question est souvent posée par ceux qui côtoient la relativité générale pour la première fois.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

bure *négative*. En bref, la courbure positive signifie que nous sommes plus limités dans nos possibilités de mouvements, et négative que nous le sommes moins. Une courbure *constante* implique même que nous sommes enfermés dans un espace fini. Vous devriez pouvoir vérifier cela à l'aide de la Figure 68.

La troisième manière de mesurer la courbure consiste à utiliser des triangles. Sur des surfaces courbes, la somme des angles d'un triangle est soit plus grande, soit plus petite que π (deux angles droits).

Réf. 147 Regardons comment nous pouvons quantifier la courbure. Tout d'abord, faisons une mise au point terminologique : on dit qu'une sphère de rayon a est, par définition, dotée d'une courbure intrinsèque $K = 1/a^2$. Par conséquent, un plan possède une courbure nulle. Vous devriez vérifier que, pour un cercle tracé sur une sphère, le rayon r, la circonférence C et l'aire A mesurés sont reliés par

Défi 249 e

$$C = 2\pi r(1 - \frac{K}{6}r^2 + \ldots) \quad \text{et} \quad A = \pi r^2(1 - \frac{K}{12}r^2 + \ldots) \tag{184}$$

où les points de suspension désignent les termes d'ordres supérieurs. Cela nous permet de définir la courbure intrinsèque K, également appelée courbure *gaussienne*, pour un point généralisé situé sur une surface bidimensionnelle, de l'une des deux manières équivalentes qui suivent :

$$K = 6\lim_{r\to 0}(1 - \frac{C}{2\pi r})\frac{1}{r^2} \quad \text{ou} \quad K = 12\lim_{r\to 0}(1 - \frac{A}{\pi r^2})\frac{1}{r^2}\,. \tag{185}$$

Ces expressions permettent à une fourmi de mesurer la courbure intrinsèque en chaque point d'une surface régulière quelconque*. Désormais dans ce texte, la *courbure* sera toujours considérée sous sa signification de courbure *intrinsèque*. Remarquez que la courbure peut être différente d'un endroit à l'autre, et qu'elle peut être positive, comme pour un œuf, ou négative, comme pour la zone d'un tore la plus proche du trou. La selle représente un autre exemple de ce dernier cas, mais, contrairement au tore, sa courbure change dans toutes les directions. En fait, il est tout à fait impossible de plonger une surface bidimensionnelle de courbure négative *constante* à l'intérieur d'un espace tridimensionnel ; il faut pour cela au moins quatre dimensions, comme vous pourrez le découvrir si vous

Défi 251 e tentez d'imaginer cette situation.

Pour n'importe quelle surface, en *chaque* point, la direction de la courbure maximale et la direction de la courbure minimale sont *perpendiculaires* l'une par rapport à l'autre. Cette relation, indiquée dans la Figure 69, fut découverte par Leonhard Euler au dix-huitième siècle. Vous devriez pouvoir la vérifier avec une tasse à café, avec une sculpture de Henry Moore ou avec n'importe quel autre objet courbé situé dans votre voisinage,

Défi 252 e par exemple une Volkswagen Coccinelle. La courbure gaussienne K définie dans (185)

* Si le volume n-dimensionnel d'une sphère est noté $V_n = C_n r^n$ et sa « surface » $(n-1)$-dimensionnelle

Réf. 148 $O_n = nC_n r^{n-1}$, nous pouvons généraliser l'expression de la courbure ainsi

$$K = 3(n+2)\lim_{r\to 0}(1 - \frac{V_n}{C_n r^n})\frac{1}{r^2} \quad \text{ou} \quad K = 3n\lim_{r\to 0}(1 - \frac{O_n}{nC_n r^{n-1}})\frac{1}{r^2}\,, \tag{186}$$

Défi 250 pe comme l'a indiqué Vermeil. Une célèbre devinette consiste à déterminer le nombre C_n.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

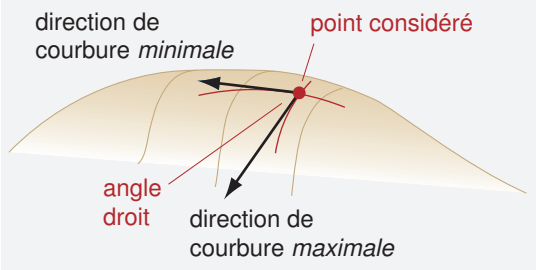


FIGURE 69 La courbure maximale et minimale d'une surface courbe.

est en réalité le produit des inverses des deux rayons de courbure correspondants. Donc, bien que la ligne de niveau de la courbure ne soit pas une propriété intrinsèque, ce produit particulier l'est. La courbure gaussienne est une mesure de la courbure intrinsèque. Les mesures de la courbure intrinsèque sont nécessaires si nous sommes obligés de rester à l'intérieur de la surface ou de l'espace que nous explorons. Les physiciens sont ainsi particulièrement attachés à la courbure gaussienne et ses analogues de dimensions plus élevées.

Pour des « surfaces » *tri*dimensionnelles, le problème est un peu plus corsé. En premier lieu, nous avons beaucoup de mal à imaginer cette situation. Mais nous pouvons toujours admettre que la courbure d'un petit disque situé autour d'un point dépendra d'une direction donnée. Examinons les exemples les plus simples. Si la courbure en un point est la même dans toutes les directions, ce point est qualifié d'*isotrope*. Nous pouvons imaginer une petite sphère qui entoure celui-ci. Dans ce cas précis, en trois dimensions, la relation entre, d'une part, le rayon r mesuré et, d'autre part, l'aire A de la surface et le volume V mesurés de la sphère entraîne que

Défi 253 pe

$$A = 4\pi r^2(1 - \frac{K}{3}r^2 + \dots) \quad \text{et} \quad V = \frac{4\pi}{3}r^3(1 - \frac{K}{5}r^2 + \dots)\,, \tag{187}$$

où K représente la courbure pour un point isotrope. Cela nous conduit à

$$K = 3\lim_{r\to 0}(1 - \frac{A}{4\pi r^2})\frac{1}{r^2} = 6\lim_{r\to 0}\frac{r - \sqrt{A/4\pi}}{r^3} = 6\lim_{r\to 0}\frac{r_{\text{excès}}}{r^3}\,, \tag{188}$$

en définissant l'*excès de rayon* par $r_{\text{excès}} = r - \sqrt{A/4\pi}$. Nous trouvons donc que pour un espace tridimensionnel *la courbure moyenne est six fois l'excès de rayon d'une petite sphère divisé par le cube du rayon*. Une courbure positive est équivalente à un excès de rayon positif, et le raisonnement est similaire pour les cas nul et négatif.

Bien évidemment, une valeur de courbure définie de cette manière n'est qu'une moyenne de toutes les directions possibles. La définition rigoureuse de la courbure concerne le disque. Pour des points qui ne sont pas isotropes, la valeur produite pour un disque sera *différente* de la valeur calculée en utilisant une sphère, puisqu'elle dépendra de l'*orientation* du disque. En réalité, il existe une relation entre toutes les courbures possibles de disques en un point donné : considérées toutes ensemble, elles doivent former un tenseur. (Pourquoi ?) Pour une description exhaustive de la courbure, nous de-

Défi 254 pe

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vons donc spécifier, comme pour n'importe quel tenseur en trois dimensions, les valeurs principales de la courbure dans trois directions orthogonales*.

Quelles sont les valeurs de la courbure dans l'espace qui nous entoure ? Déjà en 1827, le mathématicien et physicien Carl-Friedrich Gauss** était reconnu pour avoir vérifié que les trois angles formés par trois pics montagneux près de son lieu de villégiature étaient supérieurs à π. De nos jours, nous savons que l'écart δ par rapport à l'angle π, sur la surface d'un corps de masse M et de rayon r, est donné par

$$\delta = \pi - (\alpha + \beta + \gamma) \approx A_{\text{triangle}} K = A_{\text{triangle}} \frac{GM}{r^3 c^2} \,. \tag{189}$$

Cette expression est caractéristique des géométries hyperboliques. Pour le cas de la courbure mathématique négative K, la première égalité fut déduite par Johann Lambert (1728–1777). Toutefois, ce fut Einstein qui découvrit que la courbure négative K est reliée à la masse et à l'accélération gravitationnelle d'un corps. Pour le cas de la Terre et des distances typiques concernant les montagnes, l'angle δ est de l'ordre de 10^{-14} rad. Gauss n'avait aucune chance de déceler le moindre écart, et en réalité il n'en détecta aucun. Même aujourd'hui, des études faisant appel à des lasers et des appareils de haute précision n'ont détecté aucune déviation jusqu'à présent – sur Terre. Le facteur du membre de droite, qui mesure la courbure de l'espace-temps à la surface de la Terre, est naturellement trop petit. Mais Gauss ne savait pas, contrairement à nous maintenant, que la gravitation et la courbure étaient pieds et poings liés.

Courbure et espace-temps

> « Notre tête est ronde pour permettre à la pensée de changer de direction. »
>
> Francis Picabia***

* Ces trois valeurs pour les disques ne sont toutefois pas indépendantes puisque, ensemble, elles doivent produire la courbure volumique moyenne K citée ci-dessus. Au total, il y a ainsi *trois* scalaires indépendants décrivant la courbure en trois dimensions (en chaque point). Avec le tenseur métrique g_{ab} et le tenseur de Ricci R_{ab} qui sont introduits ci-dessous, une possibilité consiste à prendre les valeurs $R = -2K$, $R_{ab}R^{ab}$ et $\det R/\det g$ pour les trois nombres indépendants.

** Carl-Friedrich Gauß (n. Brunswick 1777 , d. Göttingen 1855) fut un mathématicien allemand. Avec Leonhard Euler, il fut le mathématicien le plus prolifique de tous les temps. Tel un remarquable enfant prodige, lorsqu'il avait 19 ans, il construisit l'heptadécagone régulier à l'aide d'un compas et d'une règle (consultez www.mathworld.wolfram.com/Heptadecagon.html). Il était si fier de son résultat qu'il demanda à ce que l'on grave un dessin de cette figure sur sa tombe. Gauss présenta une kyrielle de résultats en théorie des nombres, en topologie, en statistiques, en algèbre, sur les nombres complexes et en géométrie différentielle, qui représentent tous des pans entiers des mathématiques modernes et qui portent son nom. Parmi ses nombreuses réalisations, il produisit une théorie de la courbure et développa la géométrie non euclidienne. Il travailla également sur l'électromagnétisme et l'astronomie.

Gauss avait un tempérament dur, travaillait toujours tout seul et n'enseigna jamais les mathématiques. Il publiait très peu, et sa devise était : « pauca sed matura » (« peu mais mûr »). En conséquence, lorsqu'un autre mathématicien publiait un nouveau résultat, il exhibait régulièrement une note dans laquelle il avait déjà inscrit exactement le même résultat quelques années auparavant. Ses notes sont dorénavant disponibles en ligne sur www.sub.uni-goettingen.de.

*** Francis Picabia (n. Paris 1879 , d. *id.* 1953) fut un peintre dadaïste et surréaliste français.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

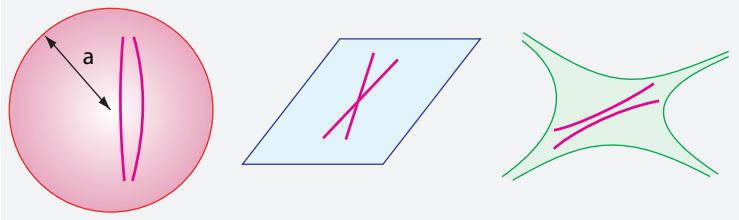


FIGURE 70 Courbure positive, nulle et négative (en deux dimensions) et comportement géodésique.

Dans la nature, avec *quatre* dimensions d'espace-temps, déterminer la courbure requiert une approche plus compliquée. En premier lieu, l'utilisation des coordonnées de l'espace-temps introduit automatiquement la vitesse de la lumière c comme vitesse limite, laquelle est une contrainte cruciale pour la relativité générale. En outre, le nombre de dimensions étant de quatre, nous nous attendons à avoir une valeur pour une courbure moyenne en un point, définie en comparant le 4-volume d'une 4-sphère dans l'espace-temps avec celui déduit du rayon mesuré. Nous nous attendons alors à avoir un ensemble de courbures « presque moyennes » définies par les 3-volumes des 3-sphères dans diverses orientations, en sus d'un ensemble de courbures de « niveau inférieur » définies par les 2-aires classiques des 2-disques usuels dans des directions encore plus nombreuses. Évidemment, nous avons besoin de mettre un peu d'ordre pour dévoiler cet ensemble, et nous avons besoin d'éliminer le comptage redondant que nous avons rencontré dans le cas de trois dimensions.

Par chance, la physique peut nous aider à rendre les mathématiques plus accessibles. Commençons en définissant ce que nous entendons par courbure de l'espace-temps. Nous définirons alors les courbures pour des disques d'orientations diverses. Pour réaliser cela, nous interprétons la définition de la courbure d'une autre manière, laquelle nous permet de la généraliser aussi pour le temps. La Figure 70 illustre l'idée que la courbure K décrit également comment les géodésiques *divergent*. Les géodésiques sont les chemins les plus directs sur une surface, c'est-à-dire les itinéraires qu'un minuscule véhicule ou un vélo suivrait s'il roulait sur la surface en maintenant son cap droit devant lui.

Si un espace est courbé, la distance s qui sépare deux géodésiques augmentera le long des géodésiques comme Défi 255 e

$$\frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}l^2} = -Ks + \text{ordres supérieurs} \tag{190}$$

où l mesure la longueur parcourue le long de la géodésique, et K est la courbure, autrement dit l'inverse du rayon de courbure au carré. Dans l'espace-temps, cette relation est étendue en substituant le temps propre (multiplié par la vitesse de la lumière) à la longueur propre. Donc la séparation et la courbure sont reliées par

$$\frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}\tau^2} = -Kc^2 s + \text{ordres supérieurs}\,. \tag{191}$$

Mais c'est la définition d'une accélération. Autrement dit, ce qui dans la situation pure-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ment spatiale est décrit par la *courbure* devient l'*accélération relative* de deux particules chutant librement depuis des points proches, dans le cas de l'espace-temps. En réalité, Page 136 nous avons déjà rencontré ces accélérations : elles décrivent les forces de marée. En bref, la courbure de l'espace-temps et les forces de marée sont précisément les mêmes choses.

Incontestablement, la grandeur des forces de marée, et donc la courbure, dépendra de l'orientation – plus précisément de l'orientation du plan de l'espace-temps généré par les vitesses des deux particules. Cette définition montre également que K représente un ten- Défi 256 pe seur, donc par la suite nous devrons lui adjoindre des indices. (Combien ?) Le plus amusant est que nous pouvons tout de même éviter d'ajouter des indices pendant un certain Réf. 149 temps en considérant une combinaison particulière de courbures spatiales. Si nous prenons trois plans plongés dans l'espace, tous perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et se coupant en un point donné, la *somme* des trois valeurs des courbures *sectionnelles ne* dépend *pas* de l'observateur. (Cela correspond à la trace du tenseur.) Pouvez-vous Défi 257 pe entériner ce point, en utilisant la définition de la courbure que nous venons de donner ?

La somme des trois courbures sectionnelles définies pour des plans réciproquement perpendiculaires, $K_{(12)}$, $K_{(23)}$ et $K_{(31)}$, est reliée à l'excès de rayon défini plus haut. Défi 258 pe Pouvez-vous trouver comment ?

Si une surface possède une courbure (intrinsèque) *constante*, c'est-à-dire la même courbure en tous ses points, des objets géométriques peuvent y être déplacés sans être Défi 259 e déformés. Pouvez-vous illustrer cela ?

En résumé, la courbure n'est pas un concept si difficile à appréhender. Elle décrit la Réf. 150 *déformation* de l'espace-temps. Si nous imaginons l'espace(-temps) comme une énorme goutte de caoutchouc dans laquelle nous vivons, la courbure en un point décrit comment cette goutte est comprimée en ce point. Puisque nous vivons *à l'intérieur* du caoutchouc, nous avons besoin d'utiliser des méthodes « *in situ* » telles que les excès de rayons et les courbures sectionnelles pour décrire cette déformation. La relativité paraît souvent difficile à assimiler parce que les gens n'aiment pas imaginer le vide de cette manière, et encore moins l'expliquer de cette façon. (Pendant une centaine d'années, ce fut une profession de foi pour chaque physicien que d'affirmer que l'espace vide était vide.) En schématisant le vide comme une substance, nous pouvons améliorer de multiples façons notre manière de comprendre la relativité générale.

Courbure et mouvement en relativité générale

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, une moitié de la relativité générale concerne l'idée que n'importe quel objet se déplace le long des trajectoires de temps propres *maximaux*, c'est-à-dire le long des géodésiques. L'*autre* moitié est contenue dans une expression élémentaire : pour *chaque* observateur, la somme des trois courbures sectionnelles *spatiales propres* en un point est donnée par

$$K_{(12)} + K_{(23)} + K_{(31)} = \frac{8\pi G}{c^4} W^{(0)} \tag{192}$$

où $W^{(0)}$ est la densité *propre* d'énergie en ce point. Les indices inférieurs indiquent la courbure combinée définie par les trois directions orthogonales 1, 2 et 3. Ce paragraphe à lui seul résume toute la relativité générale.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 260 e On trouve facilement une expression équivalente en utilisant l'excès de rayon défini ci-dessus, en introduisant la masse $M = VW^{(0)}/c^2$. Pour l'aire A enveloppant le volume V contenant cette masse, nous obtenons

$$r_{\text{excès}} = r - \sqrt{A/4\pi} = \frac{G}{3c^2}M \,. \tag{193}$$

En bref, la relativité générale proclame que, pour chaque observateur, *l'excès de rayon d'une minuscule sphère est donné par la masse contenue à l'intérieur de cette sphère**.

Remarquez que l'expression précédente implique que la courbure spatiale moyenne en un point situé dans l'espace vide *s'annule*. Comme nous le verrons bientôt, cela signifie que près d'une masse sphérique la valeur négative de la courbure *vers* cette masse est égale au double de la courbure *autour* de cette masse, et la somme totale est donc bien nulle.

La courbure est également différente d'un point à l'autre. En particulier, l'expression précédente entraîne que, si l'énergie *se déplace*, la courbure se déplacera avec elle. En bref, la courbure de l'espace et en même temps, comme nous allons le voir, la courbure de l'espace-temps *varient* en fonction de l'espace et du temps.

Nous remarquons au passage que la courbure possède un effet ennuyeux : la vitesse Défi 261 pe relative d'observateurs *éloignés* n'est pas définie. Pouvez-vous appuyer cet argument ? Dans l'espace courbe, la vitesse relative est définie uniquement pour des objets *proches* – en réalité uniquement pour des objets à une distance nulle. Ce n'est que dans l'espace plat que les vitesses relatives pour des objets éloignés sont bien définies.

Les grandeurs apparaissant dans l'expression (192) sont *indépendantes* de l'observateur. Mais souvent les gens veulent utiliser des quantités qui dépendent de l'observateur. La relation devient alors plus complexe, la seule équation (192) doit être étendue à dix équations, appelées *équations du champ d'Einstein*. Elles seront introduites plus loin. Mais, avant d'aborder cela, nous allons vérifier que la relativité générale est bien cohérente. Nous allons nous assurer qu'elle contient bien la relativité restreinte comme un cas limite, puis nous passerons directement au test principal.

Gravitation universelle

> « La seule raison qui fait que je reste ici, c'est la gravité. »
>
> Anonyme

Pour des valeurs de vitesses et de courbures faibles, les courbures temporelles $K_{(0j)}$ possèdent alors une propriété particulière. Dans ce cas, elles peuvent être définies comme les dérivées spatiales secondes d'une fonction φ d'un seul scalaire. En d'autres termes, Défi 262 e nous pouvons écrire

Réf. 151 * Une autre formulation équivalente établit que pour des rayons minuscules l'aire A est donnée par

$$A = 4\pi r^2 (1 + \frac{1}{9} r^2 R) \tag{194}$$

où R est le scalaire de Ricci, qui sera introduit plus tard.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

$$K_{(0j)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial (x^j)^2} \,. \tag{195}$$

Dans les situations courantes, il s'avère que la fonction φ est le potentiel gravitationnel. En réalité, la gravitation universelle est le cas limite de la relativité générale pour les petites vitesses et les courbures spatiales faibles. Ces deux restrictions impliquent, en utilisant $W^{(0)} = \rho c^2$ et $c \to \infty$, que

$$K_{(ij)} = 0 \quad \text{et} \quad K_{(01)} + K_{(02)} + K_{(03)} = 4\pi G\rho \,. \tag{196}$$

En d'autres termes, pour des vitesses faibles, l'espace est plat et le potentiel vérifie l'équation de Poisson. La gravitation universelle est donc en fait la limite de la relativité générale pour une vitesse faible et une courbure restreinte.

Pouvez-vous montrer que la relation (192) entre la courbure et la densité d'énergie signifie en réalité que le temps près d'une masse dépend de la hauteur, comme nous
Défi 263 pe l'avons stipulé au début de ce chapitre ?

La métrique de Schwarzschild

Réf. 149 Quelle est la courbure de l'espace-temps à proximité d'une masse sphérique ?
Défi 264 pe La courbure de la métrique de Schwarzschild est donnée par

$$\begin{aligned} K_{r\varphi} = K_{r\theta} = -\frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \quad &\text{et} \quad K_{\theta\varphi} = 2\frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \\ K_{t\varphi} = K_{t\theta} = \frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \quad &\text{et} \quad K_{tr} = -2\frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \end{aligned} \tag{197}$$

Réf. 149 en chaque point. La dépendance en $1/r^3$ découle de la dépendance générale à toutes les forces de marée, nous les avons déjà calculées dans le chapitre sur la gravitation
Page 136 universelle. Les facteurs G/c^2 sont dus à la force maximale de la gravité ; seuls les premiers facteurs numériques nécessitent d'être évalués à partir de la relativité générale.
Défi 265 pe La courbure moyenne s'annule manifestement, de même que pour tout espace vide. Comme attendu, les valeurs des courbures près de la surface de la Terre sont excessivement dérisoires.

Curiosités et défis amusants sur la courbure

Une abeille s'est posée sur le côté extérieur d'un verre cylindrique, 1 cm en dessous de son bord. Une goutte de miel est située à mi-chemin d'un tour complet du verre, toujours sur le côté extérieur, 2 cm en dessous de son bord. Quelle est pour l'abeille la distance la
Défi 266 e plus courte pour aller jusqu'à la goutte ? Quelle est la distance la plus courte si la goutte est située *à l'intérieur* du verre ?

* *

Où sont situés les points de la courbure gaussienne la plus élevée et la moins élevée sur
Défi 267 e un œuf ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

UNIVERSALITÉ DES OBSERVATEURS – MATHÉMATIQUES PLUS PROFONDES*

> Jeder Straßenjunge in unserem mathematischen Göttingen versteht mehr von vierdimensionaler Geometrie als Einstein. Aber trotzdem hat Einstein die Sache gemacht, und nicht die großen Mathematiker.
>
> David Hilbert**

Maintenant que nous avons une intuition de la courbure, nous voulons la décrire d'une manière telle que *n'importe quel* observateur puisse communiquer avec n'importe quel *autre* observateur. Malheureusement, cela signifie qu'il faut utiliser des formules avec des tenseurs. Ces formules semblent intimidantes. Le défi consiste à percevoir dans chacune de ces expressions l'idée essentielle (par exemple en faisant abstraction de tous les indices pendant un certain temps) et de ne pas se laisser distraire par toutes ces petites lettres qui s'éparpillent tout autour d'elles.

La courbure de l'espace-temps

> Il faut suivre sa pente, surtout si elle monte.
>
> André Gide

Nous avons mentionné ci-dessus qu'un espace-temps quadridimensionnel est décrit par la 2-coubure, la 3-courbure et la 4-courbure. De nombreux textes sur la relativité générale commencent avec la 3-courbure. Ces courbures révèlent la distinction qui existe entre le 3-volume calculé à partir d'un rayon et le 3-volume réel. Elles sont décrites par le *tenseur de Ricci****. À l'aide d'un argument que nous avons déjà rencontré pour le cas de l'écart géodésique, il apparaît que le tenseur de Ricci décrit comment la forme d'un nuage sphérique de particules chutant librement est modifiée durant sa course.

En bref, le tenseur de Ricci est la version en relativité générale de $\Delta\varphi$ ou, encore mieux, de $\Box\varphi$.

La définition la plus générale, mais la moins détaillée, de la courbure est celle qui décrit la distinction entre le 4-volume calculé à partir d'un rayon mesuré et le véritable 4-volume. C'est la *courbure moyenne* en un point de l'espace-temps, qui est représentée par ce que nous appelons le *scalaire de Ricci R*, défini comme suit :

$$R = -2K = -\frac{2}{r^2_{\text{courbure}}} \,. \tag{198}$$

* Cette section pourra être sautée en première lecture. La section sur la cosmologie, à la page 196, constitue alors le bon jalon permettant de poursuivre.

** « Chaque gamin dans les rues de notre Göttingen mathématique en sait plus qu'Einstein concernant la géométrie quadridimensionnelle. Néanmoins, ce fut Einstein qui fit le travail, et non pas les grands mathématiciens. »

*** Gregorio Ricci-Cubastro (n. Lugo 1853 , d. Bologne 1925) était un mathématicien italien. Il est le père du calcul différentiel absolu (plus tard renommé calcul tensoriel [N.D.T.]), également dénommé « calcul de Ricci » en ce temps-là. Tullio Levi-Civita était son assistant.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Il apparaît que le scalaire de Ricci peut être dérivé du tenseur de Ricci en utilisant ce que l'on appelle la *contraction tensorielle*, qui représente une procédure précise de moyennage. Pour des tenseurs de rang deux, la contraction est équivalente à la prise en compte de la trace :

$$R = R^{\lambda}{}_{\lambda} = g^{\lambda\mu}R_{\lambda\mu} \,. \tag{199}$$

Le scalaire de Ricci décrit la courbure moyennée sur l'espace *et* le temps. Dans l'image d'un nuage sphérique qui chute, le scalaire de Ricci décrit la variation de volume de ce nuage. Il s'annule toujours dans le vide. Ce résultat nous permet, à la surface de la Terre, d'associer la courbure spatiale à la variation du temps avec l'altitude.

Défi 268 pe

Une idée découverte par Einstein, après deux années de travail acharné, surgit maintenant. La quantité cruciale pour la description de la courbure dans la nature n'est pas le tenseur de Ricci R_{ab}, mais un tenseur construit à partir de celui-ci. Ce *tenseur d'Einstein* G_{ab} est défini mathématiquement (pour une constante cosmologique nulle) comme

$$G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R \,. \tag{200}$$

Il n'est pas difficile de comprendre sa signification. La valeur G_{00} représente la somme des courbures sectionnelles dans les plans *orthogonaux* à la direction 0 et donc la somme de toutes les courbures sectionnelles spatiales :

$$G_{00} = K_{(12)} + K_{(23)} + K_{(31)} \,. \tag{201}$$

De façon similaire, pour chaque dimension i, l'élément diagonal G_{ii} est la somme (en prenant en considération le signe moins de la métrique) des courbures sectionnelles dans les plans *orthogonaux* à la direction i. Par exemple, nous avons

$$G_{11} = K_{(02)} + K_{(03)} - K_{(23)} \,. \tag{202}$$

La distinction entre le tenseur de Ricci et le tenseur d'Einstein s'établit donc selon le mode de combinaison des courbures sectionnelles : des disques *contenant* la coordonnée en question dans un cas, des disques *perpendiculaires* à cette coordonnée dans l'autre cas. Les deux décrivent la courbure de l'espace-temps aussi efficacement, et fixer l'une signifie que nous fixons l'autre. (Que représentent la trace et le déterminant du tenseur d'Einstein ?)

Défi 269 d

Le tenseur d'Einstein est symétrique, ce qui signifie qu'il possède *dix* composantes indépendantes. Plus important, sa divergence s'annule : il décrit par conséquent une quantité conservée. Ce fut la propriété essentielle qui permit à Einstein de l'associer à la masse et à l'énergie en langage mathématique.

La description de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie

De toute évidence, pour obtenir une description complète de la gravitation, les déplacements de quantité de mouvement et d'énergie doivent également être quantifiés d'une manière telle qu'un observateur quelconque puisse communiquer avec n'importe quel

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

autre. Nous avons vu que la quantité de mouvement et l'énergie apparaissent toujours ensemble dans les descriptions relativistes ; l'étape suivante consiste donc à découvrir comment leurs déplacements peuvent être mesurés pour des observateurs généraux.

Avant toute chose, la quantité qui décrit l'énergie, appelons-la T, doit être définie en utilisant le vecteur énergie–impulsion $\mathbf{p} = m\mathbf{u} = (\gamma mc, \gamma m\mathbf{v})$ de la relativité restreinte. Par ailleurs, T ne décrit pas une particule unique, mais la manière dont l'énergie–impulsion est distribuée dans l'espace et le temps. Ainsi, il est plus commode d'utiliser T pour décrire une *densité* d'énergie et de quantité de mouvement. T sera donc un *champ*, et sera fonction du temps et de l'espace, ce que l'on indique généralement par la notation $T = T(t, x)$.

Puisque la densité d'énergie–impulsion T décrit une densité qui est fonction de l'espace et du temps, elle définit, en chaque point de l'espace-temps et pour chaque surface infinitésimale d$\mathbf{A}$ au voisinage de ce point, le flux d'énergie–impulsion d$\mathbf{p}$ qui traverse cette surface. En d'autres termes, T est défini par la relation

$$\mathrm{d}\mathbf{p} = T\,\mathrm{d}\mathbf{A}\ . \tag{203}$$

La surface est supposée être caractérisée par son vecteur normal d$\mathbf{A}$. Puisque la densité d'énergie–impulsion est un facteur de proportionnalité entre deux vecteurs, T est un *tenseur*. Bien sûr, nous sommes en train de parler ici de 4-flux et de 4-surfaces. Par conséquent, le tenseur densité d'énergie–impulsion peut être divisé de la manière suivante :

$$T = \left(\begin{array}{c|ccc} w & S_1 & S_2 & S_3 \\ \hline S_1 & t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ S_2 & t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ S_3 & t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} \text{densité} & \text{flux d'énergie ou} \\ \text{d'énergie} & \text{densité d'impulsion} \\ \hline \text{flux d'énergie ou} & \text{densité du} \\ \text{densité d'impulsion} & \text{flux d'impulsion} \end{array}\right) \tag{204}$$

où $w = T_{00}$ est un 3-scalaire, $\mathbf{S}$ un 3-vecteur et t un 3-tenseur. La quantité totale T est appelée le *tenseur (densité d')énergie–impulsion*. Il possède deux propriétés essentielles : il est symétrique et sa divergence s'annule.

La divergence nulle du tenseur T, souvent notée comme suit :

$$\partial_a T^{ab} = 0 \quad \text{ou abrégée} \quad T^{ab}{}_{,a} = 0\ , \tag{205}$$

exprime le fait que le tenseur décrit une quantité *conservée*. Dans chaque volume, l'énergie peut varier uniquement via le flux qui traverse sa surface frontalière. Pouvez-vous confirmer que la description de l'énergie–impulsion avec ce tenseur satisfait la condition que deux observateurs quelconques, ayant des positions, des orientations, des vitesses *et* des accélérations différentes, peuvent échanger l'un l'autre leurs résultats et se comprendre ?

Défi 270 pe

Le tenseur densité d'énergie–impulsion fournit une description complète de la distribution de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la masse dans l'espace et le temps. Pour prendre un exemple, déterminons la densité d'énergie–impulsion pour un liquide en mouvement. Pour un liquide de densité ρ, de pression p et de quadrivitesse $\mathbf{u}$, nous

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

avons

$$T^{ab} = (\rho_0 + p)u^a u^b - p g^{ab} \tag{206}$$

où ρ_0 identifie la densité mesurée dans le référentiel comobile, c'est-à-dire la densité *propre*[*]. Évidemment, ρ, ρ_0 et p dépendent de l'espace et du temps.

Bien entendu, pour un fluide matériel en particulier, nous avons besoin de savoir comment la pression p et la densité ρ sont reliées. Une caractérisation complète du matériau nécessite donc la connaissance de la relation

$$p = p(\rho) \,. \tag{208}$$

Cette relation étant une propriété matérielle, elle *ne* peut donc *pas* être déterminée à partir de la relativité. Elle doit être dérivée à partir des constituants de la matière ou du rayonnement et de leurs interactions. Le cas le plus simple possible est représenté par la *poussière*, c'est-à-dire la matière constituée de particules ponctuelles[**] n'interagissant pas. Son tenseur énergie–impulsion est donné par

$$T^{ab} = \rho_0 u^a u^b \,. \tag{209}$$

Défi 271 pe Pouvez-vous expliquer la différence avec le cas du liquide ?

Défi 272 pe La divergence du tenseur énergie–impulsion est nulle pour tous les instants et toutes les positions, comme vous devez pouvoir le vérifier. Cette propriété est la même que pour le tenseur d'Einstein présenté ci-dessus. Mais avant d'approfondir ce problème, faisons une brève remarque. Nous n'avons pas pris en compte l'*énergie gravitationnelle*. Il apparaît que celle-ci ne peut pas être définie de manière générale. La gravitation n'est *pas* une interaction et ne doit *pas* avoir une énergie associée[***].

Action de Hilbert – Comment les choses tombent-elles ?

Lorsque Einstein avait discuté de son travail avec David Hilbert, ce dernier avait trouvé une manière de faire en quelques semaines ce qui avait pris des années à Einstein. Hilbert avait compris que la relativité générale *dans un espace vide* pouvait être décrite par l'intégrale d'une action, comme pour tous les autres systèmes physiques.

---

[*] Nous avons donc dans le référentiel *comobile*

$$T^{ab} = \begin{pmatrix} \rho_0 c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix} . \tag{207}$$

[**] Bien que la relativité générale interdise expressément l'existence de particules ponctuelles, l'approximation est utile dans les cas où les distances entre les particules sont énormes comparées à leur propre taille.

[***] Dans certaines circonstances particulières, tels les champs faibles, le mouvement lent ou un espace-temps asymptotiquement plat, nous *pouvons* définir l'intégrale de la composante G^{00} du tenseur d'Einstein comme une énergie gravitationnelle négative. L'énergie gravitationnelle n'est donc décrite qu'*approximativement*, et uniquement pour notre environnement quotidien. Néanmoins, cette approximation conduit à la célèbre conjecture que l'énergie totale de l'Univers est nulle. Êtes-vous d'accord ?

Page ??
Défi 273 pe

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Ainsi Hilbert s'en est sorti en trouvant la mesure du changement, puisque c'est ce que décrit une action, pour le mouvement causé par la gravitation. Manifestement, cette mesure doit être indépendante de l'observateur, et en particulier elle doit être invariante sous tous les changements possibles de points de vue.

Le mouvement engendré par la gravité est déterminé par la courbure. Une mesure quelconque de la courbure, indépendante de l'observateur, doit être une combinaison du scalaire de Ricci R et de la constante cosmologique Λ. Il est donc logique de s'attendre à ce que le changement de l'espace-temps soit décrit par une action S donnée par

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R + 2\Lambda)\, \mathrm{d}V \,. \tag{210}$$

L'élément de volume $\mathrm{d}V$ doit être spécifié pour pouvoir utiliser cette expression dans des calculs. La constante cosmologique Λ (rajoutée quelques années après les travaux de Hilbert) apparaît comme une possibilité mathématique de décrire l'action la plus générale, qui soit invariante par difféomorphisme. Nous verrons plus loin que sa valeur dans la nature, bien que petite, semble être différente de zéro.

L'action de Hilbert d'une région significative de l'espace-temps est donc l'intégrale du scalaire de Ricci et du double de la constante cosmologique, sur cette région. Le principe de moindre action établit que l'espace-temps se déplace de telle manière que cette intégrale varie le moins possible.

En résumé, à la question « comment les choses bougent-elles ? » la relativité générale répond de la même manière que la relativité restreinte : *les choses suivent les trajectoires de vieillissement maximal*.

Défi 274 pe Pouvez-vous montrer que l'action de Hilbert découle de la force maximale ?

Les symétries de la relativité générale

La principale symétrie du lagrangien de la relativité générale est appelée *invariance par difféomorphisme*.

Les équations du champ pour l'espace-temps vide dénotent également une *symétrie d'échelle*. Elle représente l'invariance de ces équations après multiplication de toutes les coordonnées par un facteur numérique commun. En 1993, Torre et Anderson ont montré que la symétrie difféomorphisme et la symétrie d'échelle triviale sont les *seules* symétries
Réf. 152 des équations du champ du vide.

Mis à part la symétrie difféomorphisme, la relativité générale complète, incluant la masse–énergie, possède une symétrie supplémentaire qui n'est pas encore totalement élucidée. Cette symétrie relie les diverses conditions initiales possibles des équations du champ ; cette symétrie est extrêmement complexe et constitue toujours un domaine actif
Réf. 153 de recherches. Ces enquêtes fascinantes devraient fournir de nouvelles perspectives dans la description classique du Big Bang.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Équations du champ d'Einstein

> [La théorie de la relativité générale d'Einstein] dissimulait l'effroyable émergence de l'inexistence de Dieu.
>
> Un chasseur de sorcières de Boston, vers 1935

> Croyez-vous en Dieu ? Réponse prépayée de 50 mots.
>
> Télégramme ultérieur d'un inconnu à son héros Albert Einstein

> Je crois au Dieu de Spinoza, qui se révèle dans l'ordre harmonieux de ce qui existe, et non en un dieu qui se préoccupe du sort et des actions des êtres humains.
>
> Réponse d'Albert Einstein

Les célèbres équations du champ d'Einstein furent à l'origine de nombreuses critiques religieuses. Elles contiennent la description complète de la relativité générale. Page 98 Comme expliqué ci-dessus, elles découlent de la force maximale – ou, de manière équivalente, de l'action de Hilbert – et sont données par

$$G_{ab} = -\kappa\, T_{ab}$$

ou

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R - \Lambda g_{ab} = -\kappa\, T^{ab} \,. \tag{211}$$

On a mesuré que la constante κ, appelée *constante de couplage gravitationnel*, vaut

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4} = 2{,}1 \cdot 10^{-43}\,/\mathrm{N} \tag{212}$$

et sa minuscule valeur – 2π divisé par la force maximale $c^4/4G$ – reflète la faiblesse de la gravité dans la vie quotidienne, ou mieux, la difficulté à courber l'espace-temps. La constante Λ, ou *constante cosmologique*, correspond à une masse volumique d'énergie du vide, ou Λ/κ à une pression. Sa très basse valeur fait qu'elle est plutôt difficile à mesurer. Page 221 La valeur courante qui recueille le plus de faveurs est

$$\Lambda \approx 10^{-52}\,/\mathrm{m}^2 \quad \text{ou} \quad \Lambda/\kappa \approx 0{,}5\,\mathrm{nJ/m}^3 = 0{,}5\,\mathrm{nPa} \,. \tag{213}$$

Réf. 154 Des mesures et des simulations récentes suggèrent que ce paramètre, bien qu'il soit numériquement proche de l'inverse du carré du rayon actuel de l'Univers, est une constante de la nature qui ne varie pas avec le temps.

En résumé, les équations du champ établissent que la courbure en un point est égale au flux d'énergie–impulsion qui traverse ce point, en prenant en compte la densité d'énergie du vide. Autrement dit, *l'énergie–impulsion dicte à l'espace-temps comment il doit se courber**.

* Einstein parvint à établir ses équations du champ en utilisant un grand nombre de directives abstraites qui

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les équations du champ de la relativité générale peuvent être simplifiées dans le cas où les vitesses sont faibles. Dans cette situation, $T_{00} = \rho c^2$ et toutes les autres composantes de T s'annulent. En utilisant la définition de la constante κ et en posant $\varphi = (c^2/2)h_{00}$ dans $g_{ab} = \eta_{ab} + h_{ab}$, nous trouvons

Défi 275 pe

$$\nabla^2\varphi = 4\pi\rho \quad \text{et} \quad \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = -\nabla\varphi \tag{214}$$

que nous connaissons bien, puisque cela peut être réexprimé comme suit : un corps de masse m situé à proximité d'un autre corps de masse M est accéléré par

$$a = G\frac{M}{r^2}, \tag{215}$$

une valeur qui est indépendante de la masse m du corps qui chute. Et en fait, comme l'avait déjà remarqué Galilée, tous les corps chutent avec la même accélération, indépendamment de leur taille, de leur masse, de leur couleur, etc. En relativité générale aussi la gravitation est entièrement impartiale*. L'indépendance entre la chute libre et la masse du corps qui tombe découle de la description de l'espace-temps comme un ma-

sont qualifiées de *principes* dans la littérature. Aujourd'hui, plusieurs d'entre elles ne sont pas considérées comme étant primordiales. Néanmoins, nous en donnons un court aperçu.

- *Principe de relativité générale* : tous les observateurs sont équivalents, ce principe, bien qu'il soit fréquemment exprimé, est probablement vide de tout contenu physique.

- *Principe de covariance générale* : les équations de la physique doivent être formulées sous forme tensorielle, même si nous savons aujourd'hui que toutes les équations peuvent être écrites avec des tenseurs, y compris la gravitation universelle ; dans de nombreux cas elles requièrent des éléments « absolus » non physiques, c'est-à-dire des quantités qui influent sur les autres mais pas sur elles-mêmes. Cette idée non physique est en contradiction avec l'idée d'*inter*action, comme nous l'avons déjà expliqué.

Réf. 155

Page 218

- *Principe de couplage minimal* : les équations du champ de la gravitation sont déduites de celles de la relativité restreinte en considérant la généralisation la plus simple possible. Bien sûr, maintenant que ces équations sont connues et testées expérimentalement, ce principe n'est que d'un intérêt historique.

- *Principe d'équivalence* : l'accélération est localement indiscernable de la gravitation, nous l'avons utilisé pour démontrer que l'espace-temps est semi-riemannien et que la gravitation est sa courbure.

- *Principe de Mach* : l'inertie est due à l'interaction avec le reste de l'Univers, ce principe est correct, même si l'on affirme souvent qu'il n'est pas vérifié dans la relativité générale. Dans tous les cas, il ne représente pas l'essence de la relativité générale.

Page 237

- *Identité entre masse gravitationnelle et inertielle* : elle est incluse depuis le début dans la définition de la masse, mais elle est ressassée à n'en plus finir dans les textes sur la relativité générale, et est implicitement utilisée dans la définition du tenseur de Riemann.

- *Principe de correspondance* : une nouvelle théorie plus générale, telle que la relativité générale, doit pouvoir se réduire aux théories précédentes, dans notre cas la gravitation universelle ou la relativité restreinte, lorsqu'elle est restreinte aux domaines dans lesquels celles-ci restent valides.

* Vous trouverez ici une autre manière de montrer que la relativité générale s'accorde avec la gravitation universelle. À partir de la définition du tenseur de Riemann, nous savons que l'accélération relative b_a et la vitesse de particules proches sont reliées par

$$\nabla_e b_a = R_{ceda}v^c v^d \ . \tag{216}$$

Par les symétries de R, nous savons qu'il existe un φ tel que $b_a = -\nabla_a\varphi$. Cela signifie que

$$\nabla_e b^a = \nabla_e\nabla^a\varphi = R^a_{ced}v^c v^d \tag{217}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

telas courbé. Les objets qui se déplacent sur un matelas le font tous de la même manière, indépendamment de la valeur de la masse.

Pour pouvoir nous représenter les équations complètes du champ, nous allons nous frayer un court chemin à travers leurs principales propriétés. Premièrement, tout mouvement dû à la courbure de l'espace-temps est *réversible*, *différentiable* et donc *déterministe*. Remarquez que seul le mouvement complet, c'est-à-dire de l'espace-temps *et* de la matière *et* de l'énergie, possède ces propriétés. Pour le mouvement d'une particule seule, celui-ci est en fait *irréversible*, puisqu'une certaine quantité de rayonnement gravitationnel est généralement diffusée.

Défi 276 e

En abrégeant les équations du champ nous trouvons, pour une constante cosmologique nulle, l'expression suivante pour le scalaire de Ricci :

$$R = -\kappa T \,. \tag{220}$$

Ce résultat implique aussi la relation qui existe entre l'excès de rayon et la masse contenue à l'intérieur d'une sphère.

Défi 277 pe

Les équations du champ sont *non linéaires* dans la métrique g, ce qui signifie que les sommes de solutions *ne* constituent généralement *pas* des solutions. Cela rend la recherche de ces solutions particulièrement ardue. Pour une solution complète des équations du champ, les conditions initiales et limites doivent être précisées. Les méthodes permettant de le faire forment une partie spécialisée de la physique mathématique, qui ne sont pas explorées ici.

Réf. 156

Albert Einstein avait l'habitude de dire que la relativité générale fournit les clés de la compréhension d'un côté seulement des équations du champ (211), mais pas de l'autre côté. Pouvez-vous entrevoir de quel côté il voulait parler ?

Défi 278 pe

Que pouvons-nous faire d'intéressant à l'aide de ces équations ? En fait, pour être honnête, rien de plus que ce que nous avons déjà fait jusqu'à présent. Très peu de processus nécessitent l'utilisation des équations complètes. Un grand nombre de manuels sur la relativité s'arrêtent même après les avoir dévoilées ! Cependant, cela vaut la peine de les étudier. Par exemple, nous pouvons montrer que la solution de Schwarzschild est la *seule* solution à symétrie sphérique. De manière similaire, en 1923, Birkhoff montra que, pour le vide, chaque solution symétrique par rotation est statique. C'est le cas même si les masses elles-mêmes se déplacent, comme pendant l'effondrement d'une étoile.

Les applications les plus admirables des équations du champ sont peut-être les divers *films* réalisés sur les processus relativistes. La Toile mondiale héberge plusieurs d'entre eux : ils nous permettent de voir ce qui se passe lorsque deux trous noirs fusionnent, ce qui se produit quand un observateur tombe dans un trou noir, etc. Pour produire ces films, les équations du champ nécessitent généralement d'être résolues directement, sans

---

ce qui implique que

$$\Delta\varphi = \nabla_a \nabla^a \varphi = R^a_{cad} v^c v^d = R_{cd} v^c v^d = \kappa(T_{cd} v^c v^d - T/2) \tag{218}$$

En introduisant $T_{ab} = \rho v_a v_b$, nous obtenons

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \tag{219}$$

comme nous voulions le montrer.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

l'aide d'approximations*.

Un autre domaine d'application concerne les *ondes gravitationnelles*. Les équations complètes du champ montrent que ces ondes ne sont pas harmoniques, et sont non linéaires. Les ondes sinusoïdales n'existent qu'approximativement, pour des petites amplitudes. De manière encore plus intéressante, si deux ondes se heurtent, dans de nombreux cas on prédit que des *singularités* surgissent. Ce sujet à lui seul représente toujours un domaine de recherches et pourrait apporter un nouvel éclairage sur le phénomène de quantification de la relativité générale dans les années à venir.

Nous achevons cette section avec une petite remarque. En général, les équations du champ sont lues seulement dans un sens, en stipulant que l'énergie–impulsion engendre la courbure. Nous pouvons également les lire dans l'autre sens, en calculant l'énergie–impulsion nécessaire pour produire une courbure donnée. Lorsque nous faisons cela, nous découvrons que les espaces-temps courbes ne sont pas tous possibles, puisque certains conduiraient à des densités d'énergie (ou de masse) *négatives*. De telles solutions contrediraient la limite déjà citée sur les ratios longueur sur masse pour les systèmes physiques.

Supplément sur la force limite

Lorsque la constante cosmologique entre en ligne de compte, le principe de la force maximale nécessite d'être à nouveau examiné. Dans le cas d'une constante cosmologique qui n'est pas nulle, la force limite reste cohérente uniquement si la constante Λ est positive ; c'est le cas pour la valeur mesurée actuellement, qui se situe à $\Lambda \approx 10^{-52}/\mathrm{m}^2$. Réf. 157 Réf. 95, Réf. 96 En effet, la relation rayon–masse des trous noirs

$$2GM = Rc^2\left(1 - \frac{\Lambda}{3}R^2\right) \tag{221}$$

implique qu'une force maximale *indépendante* du rayon est valide uniquement pour une constante cosmologique positive ou nulle. Pour une constante cosmologique négative, la force limite ne serait valide que pour des trous noirs infiniment petits. Du reste, nous empruntons une approche pragmatique et remarquons qu'une force limite maximale peut être vue comme impliquant une constante cosmologique nulle ou positive. Bien évidemment, la force limite ne précise pas la *valeur* de cette constante. Pour ce faire, un deuxième principe doit être ajouté. Une formulation immédiate, en utilisant le principe supplémentaire d'une force minimale dans la nature, a été proposée ci-dessus. Page 120

Nous devrions aussi nous demander si des trous noirs en rotation ou chargés modifient l'argument qui conduit de la force maximale à la dérivation de la relativité générale. Cependant, la dérivation qui utilise l'équation de Raychaudhuri ne change pas. En fait, le seul changement dans l'argument apparaît avec l'introduction de la torsion, qui modifie l'équation de Raychaudhuri elle-même. Tant que la torsion ne joue aucun rôle, la dérivation donnée ci-dessus demeure valide. L'introduction de la torsion est toujours une question ouverte de la recherche.

Une autre question consiste à savoir comment la force maximale est reliée aux théories scalaires–tensorielles de la gravitation, telle la proposition de Brans et Dicke ou ses gé-

* Voir par exemple le site Web www.photon.at/~werner/black-earth.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

néralisations. Si une théorie scalaire–tensorielle particulière obéit à l'équation générale de l'horizon (111), alors elle doit également entraîner l'existence d'une force maximale. L'équation générale de l'horizon doit être vérifiée à la fois pour des horizons *statiques* et *dynamiques*. Si c'était le cas, la théorie scalaire–tensorielle spécifique serait équivalente à la relativité générale, puisqu'elle nous permettrait, en utilisant le raisonnement de Jacobson, de déduire les équations du champ classiques. Ce cas peut survenir si le champ scalaire se comporte comme la matière, c'est-à-dire s'il possède une masse–énergie comme la matière et s'il courbe l'espace-temps comme celle-ci. D'un autre côté, si dans la théorie scalaire–tensorielle particulière l'équation générale de l'horizon (111) n'est pas vérifiée pour *tous* les horizons *en mouvement* – ce qui est le cas en général, puisque les théories scalaires–tensorielles possèdent plus de constantes définies que la relativité générale –, alors la force maximale disparaît et la théorie n'est pas équivalente à la relativité générale. Cette correspondance montre également qu'un test expérimental de l'équation de l'horizon pour des horizons *statiques* uniquement n'est pas suffisant pour confirmer la relativité générale. Un tel test éliminerait certaines théories scalaires–tensorielles seulement, mais pas toutes.

Retrouver la gravitation universelle

Pour que la limite de la force maximale soit considérée comme un principe physique fondamental, toutes les propriétés de la gravitation, y compris la théorie complète de la relativité générale, doivent être déduites à partir de celle-ci. Pour rendre ce raisonnement plus facile à suivre, nous allons le découper en plusieurs étapes. Premièrement, nous montrons que la limite de la force implique que, dans la vie de tous les jours, la loi en l'inverse du carré de la gravitation universelle est vérifiée. Ensuite, nous montrons qu'elle implique les principaux concepts de la relativité générale. Enfin, nous montrons que la théorie complète de la relativité générale s'ensuit.

En d'autres termes, à partir de maintenant nous supposons que la limite de la force est valide. Nous explorons ses conséquences et les comparons aux propriétés connues de la nature. La limite de la force maximale peut également être abordée d'une autre manière. Si l'attraction gravitationnelle entre un corps central et un satellite était *plus forte* qu'elle ne l'est, les trous noirs seraient plus petits qu'ils ne le sont : dans ce cas, la limite de la force maximale et la vitesse maximale pourraient être dépassées. Si, par contre, la gravitation était *plus faible* qu'elle ne l'est, un observateur rapide en accélération ne serait pas capable de déterminer que les deux corps interagissent. En résumé, une force maximale de $c^4/4G$ implique la gravitation universelle. Il n'existe aucune différence entre le fait d'affirmer que tous les corps s'attirent par le biais de la gravitation et le fait d'affirmer qu'il existe une force maximale ayant pour valeur $c^4/4G$.

Retrouver la relativité générale linéarisée

L'étape logique suivante consiste à montrer qu'une force maximale implique également la relativité générale. La démarche triviale consiste à répéter, étape par étape, l'approche standard de la relativité générale.

La courbure de l'espace-temps est une conséquence du fait que la vitesse de la lumière est la vitesse maximale pour *tous* les observateurs, même s'ils sont situés dans un champ gravitationnel. Le décalage vers le rouge gravitationnel indique que dans des champs gra-

Réf. 95, Réf. 96

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vitationnels les horloges voient leur cadence se modifier avec l'altitude. Ce changement, associé à la constance de la vitesse de la lumière, implique la courbure de l'espace-temps. La gravitation implique donc la courbure de l'espace-temps. La valeur de la courbure dans le cas de champs gravitationnels faibles est entièrement déterminée par la loi en l'inverse du carré de la gravité. Puisque l'attraction universelle découle de la force maximale, nous déduisons que cette dernière entraîne que l'espace-temps est courbé.

Indépendamment de la courbure, nous devons aussi valider l'autre idée fondamentale de la relativité générale. Le *principe de relativité générale* stipule que tous les observateurs sont équivalents. Puisque le principe de la force maximale s'applique à tous les observateurs, le principe de relativité générale est intégré dans celui-ci. Le *principe d'équivalence* établit que, localement, la gravitation peut être éliminée en considérant un observateur convenablement choisi. C'est également le cas pour le principe de la force maximale, qui s'applique à tous les observateurs, donc aussi aux observateurs qui ne ressentent pas localement la gravitation. Le *principe de Mach*, dont la formulation précise est variable, affirme que seules les quantités relatives devraient intervenir dans la description de la nature. Puisque la force maximale est une quantité relative – en particulier, la relation entre la masse et la courbure l'est – le principe de Mach est également satisfait.

Des corps libres situés dans un espace plat se déplacent à vitesse constante. Par le principe d'équivalence, cette affirmation se généralise en la déclaration que des corps en chute libre avancent le long des géodésiques. Le principe de la force maximale laisse intacte l'allégation que *l'espace-temps dicte à la matière comment elle doit se déplacer*.

La courbure de l'espace-temps pour des champs gravitationnels faibles est fixée par la loi en l'inverse du carré de la gravité. La courbure spatiale est donc omniprésente, avec la valeur juste, autour de chaque masse. Comme Richard Feynman l'a expliqué, en extrapolant ce résultat à tous les observateurs possibles, nous pouvons en déduire tous les effets de la gravitation de faible courbure. En particulier, cela entraîne l'existence d'ondes gravitationnelles linéaires (de faible amplitude) et l'effet de Thirring–Lense. La relativité générale linéarisée découle donc du principe de la force maximale.

Réf. 158

Comment calculer la forme des géodésiques

L'autre moitié de la relativité générale établit que les corps chutent le long des géodésiques. Toutes les orbites sont des géodésiques, donc des courbes qui maximisent le temps propre. Il est ainsi utile d'être capable de calculer ces trajectoires*. Pour commencer, nous avons besoin de connaître *la forme de l'espace-temps*, la notion de « forme » étant généralisée à partir de sa signification bidimensionnelle familière. Pour un être vivant sur cette surface, elle est habituellement décrite par la métrique g_{ab}, qui définit les distances entre des points voisins, par

$$\mathrm{d}s^2 = \mathrm{d}x_a \, \mathrm{d}x^a = g_{ab}(x) \, \mathrm{d}x^a \, \mathrm{d}x^b \ . \tag{222}$$

Un exercice classique de calcul consiste à montrer à partir de cette expression qu'une courbe $x^a(s)$ dépendant d'un paramètre s (affine) bien caractérisé est une *géodésique* (métrique) de genre espace, c'est-à-dire la trajectoire la plus longue possible entre les

* C'est une brève section qui peut intéresser les plus curieux, elle peut être sautée en première lecture.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 279 pe deux événements*, si et seulement si

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(g_{ad}\frac{\mathrm{d}x^d}{\mathrm{d}s}\right) = \frac{1}{2}\frac{\partial g_{bc}}{\partial x^a}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}x^c}{\mathrm{d}s}\,, \tag{223}$$

tant que ds est différent de zéro tout au long de la trajectoire**. Tous les corps en chute libre suivent de telles géodésiques. Nous avons montré ci-dessus que la propriété de la Page 136 géodésique implique qu'une pierre jetée en l'air retombe, à moins qu'elle soit lancée avec une vitesse supérieure à la vitesse de libération. L'expression (223) remplace donc à la fois l'expression $\mathrm{d}^2x/\mathrm{d}t^2 = -\nabla\varphi$ valable pour des corps en chute et l'expression $\mathrm{d}^2x/\mathrm{d}t^2 = 0$ valable pour des corps flottant librement en relativité restreinte.

La trajectoire ne dépend pas de la masse ou du matériau dont est constitué le corps. Réf. 159 Par conséquent, l'*antimatière* tombe également le long des géodésiques. Autrement dit, l'antimatière et la matière ne se repoussent pas, mais s'attirent également l'une vers l'autre. De manière intéressante, même les expériences réalisées avec la matière ordinaire peuvent le montrer, si elles sont soigneusement analysées. Pouvez-vous montrer Défi 280 pe comment ?

Pour être exhaustif, nous mentionnons que la lumière suit des géodésiques *nulles* ou *de genre lumière*. En d'autres termes, il existe un paramètre affine u tel que les géodésiques vérifient

$$\frac{\mathrm{d}^2x^a}{\mathrm{d}u^2} + \Gamma^a{}_{bc}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}u}\frac{\mathrm{d}x^c}{\mathrm{d}u} = 0 \tag{227}$$

avec la condition distincte que

$$g_{ab}\frac{\mathrm{d}x^a}{\mathrm{d}u}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}u} = 0\,. \tag{228}$$

Étant donné toutes ces définitions sur les divers types de géodésiques, que représentent Défi 281 pe les lignes dessinées dans la Figure 53 de la page 131 ?

---

* Nous nous rappelons que dans l'espace de la vie courante les géodésiques sont les chemins les plus courts possibles, alors que dans l'espace-temps de la relativité générale les géodésiques sont les chemins les plus longs possibles. Dans les deux cas, ils représentent des trajets « extrémaux ».

** Cela est souvent noté comme suit

$$\frac{\mathrm{d}^2x^a}{\mathrm{d}s^2} + \Gamma^a_{bc}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}x^c}{\mathrm{d}s} = 0 \tag{224}$$

où la condition

$$g_{ab}\frac{\mathrm{d}x^a}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}s} = 1 \tag{225}$$

doit être vérifiée, donc simplement en exigeant que tous les vecteurs tangents soient des vecteurs *unitaires*, et que d$s \neq 0$ tout au long de la trajectoire. Les symboles Γ apparaissant ci-dessus sont donnés par

$$\Gamma^a{}_{bc} = \left\{ \begin{matrix} a \\ bc \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2}g^{ad}\left(\partial_b g_{dc} + \partial_c g_{db} - \partial_d g_{bc}\right)\,, \tag{226}$$

et sont appelés *symboles de Christoffel de seconde espèce* ou plus simplement *connexion métrique*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La masse en relativité générale

L'invariance par difféomorphisme de la relativité générale rend la vie plutôt fascinante. Nous verrons qu'elle nous permet de dire que nous vivons *à l'intérieur* d'une sphère creuse, et qu'elle ne nous permet pas de dire où l'énergie est réellement située. Si l'énergie ne peut pas être localisée, qu'en est-il de la masse ? Il devient immédiatement clair que la masse, comme l'énergie, peut être localisée *uniquement* si l'espace-temps lointain est identifié comme étant plat. Il est alors possible de définir une valeur pour la masse localisée en précisant une idée intuitive : la masse est mesurée par le temps que met une sonde pour graviter autour du corps inconnu*.

La définition intuitive de la masse *exige* un espace-temps plat à l'infini, elle ne peut pas être étendue à d'autres situations. En bref, la masse ne peut être localisée que si la masse totale peut être définie. Et la *masse totale* n'est définie que pour un espace-temps asymptotiquement plat. La seule autre notion de masse qui soit précise en relativité générale est la *masse volumique locale* en un point. À l'opposé, nous ne comprenons pas très bien comment définir la masse contenue dans une région plus grande qu'un point mais plus petite que l'intégralité de l'espace-temps.

Défi 282 pe

Maintenant que nous pouvons continuer à discuter de masse sans avoir (trop) mauvaise conscience, revenons aux équations du mouvement.

La gravité est-elle une interaction ?

Nous avons eu tendance, jusqu'à présent, à répondre à cette question par l'affirmative, puisque dans la physique galiléenne la gravité était perçue comme une influence sur le mouvement des corps. En fait, nous l'avons décrite par un potentiel, suggérant ainsi que la gravité *engendre* le mouvement. Mais soyons prudents. Une force ou une interaction est ce qui modifie l'état de mouvement des objets. Toutefois, nous venons de voir que, lorsque deux corps s'attirent l'un vers l'autre par le truchement de la gravitation, tous deux restent toujours en chute libre. Par exemple, la Lune tourne autour de la Terre parce qu'elle chute perpétuellement vers elle. Puisque n'importe quel observateur en chute libre demeure constamment au repos, l'affirmation que la gravité modifie le mouvement des corps n'est pas correcte pour tous les observateurs. En réalité, nous découvrirons bientôt que, dans un sens qui sera précisé sous peu, la Lune et la Terre suivent toutes les deux des trajectoires « droites ».

Ce réajustement de notre idée de la gravité est-il simplement une question de mots ?

---

* Cette définition fut formalisée par Arnowitt, Deser et Misner, et depuis ce temps a souvent été dénommée la *masse ADM*. L'idée consiste à utiliser la métrique g_{ij} et à prendre l'intégrale

$$m = \frac{1}{16\pi} \int_{S_R} (g_{ij,i} v_j - g_{ii,j} v_j) \mathrm{d}A \tag{229}$$

où S_R représente la sphère des coordonnées de rayon R, v est le vecteur unitaire normal de cette sphère et $\mathrm{d}A$ est l'aire élémentaire sur la sphère. La limite existe si l'espace-temps est asymptotiquement plat et si la distribution de masse est suffisamment concentrée. Les physiciens mathématiciens ont également montré que pour une variété quelconque dont la métrique change à l'infini comme

Réf. 160

$$g_{ij} = (1 + f/r + O(1/r^2))\delta_{ij} \tag{230}$$

la masse totale est donnée par $M = 2f$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Pas vraiment. Puisque la gravité n'est pas une interaction, elle n'est *pas* due à un champ et elle ne dérive d'*aucun* potentiel.

Page 218 Vérifions cet étrange résultat d'une autre manière encore. La définition la plus fondamentale de l'« interaction » est celle de la différence entre le tout et la somme des parties. Dans le cas de la gravité, un observateur en chute libre pourrait affirmer que rien de particulier ne se produit, indépendamment du fait que l'autre corps soit présent ou non, et pourrait prétendre que la gravité n'est pas une interaction.

Toutefois, c'est aller trop loin. Une interaction transporte de l'énergie entre des systèmes. Nous avons vu en réalité que la gravité peut être considérée comme transportant de l'énergie, uniquement de façon approximative. La gravitation est donc *grosso modo* une interaction. Mais ce n'est pas une raison suffisante pour abandonner cette particularité. Le concept d'énergie n'est pas utile pour la gravité au-delà du domaine de la vie quotidienne. Pour le cas général, à savoir pour un observateur en général, la gravité est ainsi fondamentalement différente de l'électricité ou du magnétisme.

Une autre manière d'appréhender ce problème est la suivante. Prenez un satellite orbitant autour de Jupiter avec une énergie–impulsion $\mathbf{p} = m\mathbf{u}$. Si nous calculons la variation
Défi 283 pe d'énergie–impulsion le long de sa trajectoire s, nous obtenons

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}s} = m\frac{\mathrm{d}\mathbf{u}}{\mathrm{d}s} = m(\mathbf{e}_a\frac{\mathrm{d}\mathbf{u}^a}{\mathrm{d}s} + \frac{\mathrm{d}\mathbf{e}_a}{\mathrm{d}s}\mathbf{u}^a) = m\mathbf{e}_a(\frac{\mathrm{d}\mathbf{u}^a}{\mathrm{d}s} + \Gamma^a{}_{bd}\mathbf{u}^b\mathbf{u}^c) = 0 \qquad (231)$$

où $\mathbf{e}$ représente le vecteur unitaire le long d'un axe des coordonnées. La variation de l'énergie–impulsion s'annule le long d'une quelconque géodésique, comme vous pou-
Défi 284 pe vez le vérifier. Par conséquent, l'énergie–impulsion de ce mouvement est conservée. En d'autres termes, *aucune* force n'agit sur le satellite. Nous pourrions répondre que dans
Réf. 161 l'équation (231) le deuxième terme représente à lui seul la force gravitationnelle. Mais ce
Défi 285 pe terme peut être rendu nul sur l'intégralité de n'importe quelle ligne d'univers donnée. En bref, rien ne change entre deux corps en chute libre l'un autour de l'autre : nous pouvons dire que la gravitation n'est pas une interaction. Les propriétés de l'énergie
Défi 286 s confirment ce raisonnement.

Bien sûr, la conclusion que la gravitation n'est pas une interaction est quelque peu abstraite, puisqu'elle contredit notre expérience de la vie de tous les jours. Mais nous aurons besoin d'elle plus tard pour la compréhension complète du mouvement. Le comportement du rayonnement confirme cette déduction. Dans le vide, le rayonnement est toujours en mouvement libre. Dans un sens, nous pouvons dire que celui-ci chute toujours librement. Étrangement, puisque nous avons dit que la chute libre est la même chose que le repos, nous devrions conclure que le rayonnement est toujours au repos. Ce n'est pas faux ! Nous avons déjà vu que la lumière ne peut pas être accélérée*. Nous avons même vu que la déviation due à la gravitation n'est pas une accélération, car la lu-

* La réfraction, le ralentissement de la lumière à l'intérieur de la matière, ne constitue pas un contre-exemple. À proprement parler, la lumière à l'intérieur de la matière est continuellement en train d'être absorbée puis réémise. Entre ces processus, la lumière se propage toujours avec la vitesse de la lumière dans le vide. Le processus dans sa globalité *paraît* seulement ressembler à un ralentissement dans la limite macroscopique. La même chose s'applique pour la diffraction et pour la réflexion. Une liste de manières apparentes permettant de courber la lumière peut être consultée à la page 86. Les détails des processus quantomécaniques qui les fondent peuvent être trouvés à la page **??**.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mière suit des trajectoires droites dans l'espace-temps, même dans cette situation. Bien que la lumière semble ralentir en se rapprochant des masses pour des observateurs éloignés, localement elle se déplace constamment à la vitesse de la lumière. En bref, même la gravitation ne parvient pas à déplacer la lumière.

Il existe un autre procédé pour montrer que la lumière est en permanence au repos. Pour un observateur essayant d'atteindre la vitesse de la lumière, une horloge avance de plus en plus lentement. Pour la lumière, en un certain sens, le temps s'arrête : ou, si vous préférez, *la lumière ne se déplace plus*.

L'essence de la relativité générale

Si une puissance ou une force maximale surgissant aux horizons constitue le fondement de la relativité générale, nous pouvons nous demander si des systèmes physiques autres que l'espace-temps peuvent aussi être décrits de cette manière.

Pour la relativité restreinte, nous avons découvert que l'on rencontre également tous ses principaux effets – comme une vitesse limite, une contraction de Lorentz ou une équivalence masse–énergie – dans les dislocations des solides. Des systèmes comparables à la relativité générale existent-ils ? Des tentatives pour découvrir de tels systèmes y sont déjà partiellement parvenus. Plusieurs équations et idées de la relativité générale sont applicables à la déformation des solides, étant donné que celle-ci décrit la déformation du matelas de l'espace-temps. Kröner a étudié cette analogie avec beaucoup de soin. D'autres systèmes ayant des horizons, et ainsi dotés d'observables analogues à la courbure, sont débusqués dans certains liquides – où les tourbillons jouent le même rôle que les trous noirs – et dans certains fluides quantiques pour la propagation de la lumière. Explorer ces systèmes est devenu un thème de recherches à part entière. Une correspondance complète de la relativité générale dans un système macroscopique fut découverte il y a quelques années seulement. Cette analogie sera présentée dans la troisième partie de notre aventure, mais nous aurons besoin d'un ingrédient supplémentaire qui n'est pas perceptible à ce point de notre ascension.

Réf. 162
Réf. 163

Gymnastique de Riemann

La plupart des ouvrages introduisent la courbure d'une manière austère, à savoir de manière historique*, en utilisant le tenseur de courbure de Riemann. Nous en faisons un court résumé, de telle sorte que vous puissiez comprendre cet ancien procédé si jamais vous le rencontrez.

Nous avons vu plus haut que la courbure est mieux décrite par un tenseur. En 4 dimensions, ce tenseur de courbure, généralement noté R, doit être une quantité qui nous permette de calculer, entre autres, l'aire d'un 2-disque d'orientation quelconque dans l'espace-temps. Maintenant, en 4 dimensions, les orientations d'un disque sont définies par le biais de *deux* quadrivecteurs, appelons-les **p** et **q**. Et, au lieu d'un disque, nous prendrons le *parallélogramme* engendré par **p** et **q**. Il existe plusieurs définitions possibles.

Défi 287 e

Le *tenseur de courbure de Riemann–Christoffel* R est alors défini comme une quantité qui nous permet d'évaluer la courbure $K(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ pour la surface engendrée par **p** et **q**,

* C'est une brève section qui peut intéresser les plus curieux, elle peut être sautée en première lecture.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

d'aire A, à travers

$$K(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \frac{R\ \mathbf{pqpq}}{A^2(\mathbf{p},\mathbf{q})} = \frac{R_{abcd}p^a q^b p^c q^d}{(g_{\alpha\delta}g_{\beta\gamma} - g_{\alpha\gamma}g_{\beta\delta})p^\alpha q^\beta p^\gamma q^\delta} \tag{232}$$

où, comme d'habitude, les lettres latines a, b, c, d, etc. prennent des valeurs allant de 0 à 3, de même que les indices grecs, et où une *somme* sur plusieurs indices est sous-entendue lorsqu'une notation indicielle apparaît deux fois. Évidemment, R est un tenseur de rang 4. Ce tenseur décrit donc uniquement la courbure *intrinsèque* d'un espace-temps. Au contraire, la métrique g décrit la *forme* complète de la surface, et pas seulement la courbure. La courbure est donc la quantité physique localement pertinente, et des descriptions physiques utilisent par conséquent uniquement le *tenseur de Riemann*[*] R ou des quantités dérivées de celui-ci[**].

Mais nous pouvons oublier la définition de la courbure que nous venons de donner. Il existe une seconde manière, plus physique, de voir le tenseur de Riemann. Nous savons que la courbure sous-tend l'existence de la gravité. Comme nous l'avons dit avant, la gravité signifie que, lorsque deux particules proches chutent librement avec la même
Défi 288 e vitesse et la même direction, la distance entre elles change. Autrement dit, l'effet local de la gravité est l'*accélération relative* des particules proches.

Il apparaît que le tenseur R décrit précisément cette accélération relative, c'est-à-dire ce que nous appelions plus tôt les *forces de marée*. Manifestement, l'accélération relative
Défi 289 pe **b** s'accroît avec la distance de séparation **d** et le carré (pourquoi ?) de la vitesse **u** des deux particules. Par conséquent, nous pouvons également définir R comme un facteur de proportionnalité (généralisé) entre ces quantités :

$$\mathbf{b} = R\ \mathbf{u}\ \mathbf{u}\ \mathbf{d} \quad \text{ou, plus clairement,} \quad b^a = R^a{}_{bcd}\ u^b\ u^c\ d^d\ . \tag{235}$$

Les composantes du tenseur de courbure de Riemann possèdent les dimensions de l'inverse d'une longueur au carré. Puisqu'elles contiennent toute l'information concernant

* Bernhard Riemann (n. Breselenz 1826 , d. Selasca 1866) fut un important mathématicien allemand.

** Nous avons montré ci-dessus que l'espace-temps est courbé en remarquant les variations dans les rythmes des horloges, dans les longueurs des mètres étalons et dans la propagation de la lumière. Ces expériences sont les manières les plus aisées qui permettent de déterminer la métrique g. Nous savons que l'espace-temps est décrit par une variété quadridimensionnelle **M** dotée d'une métrique g_{ab} qui, localement, en chaque point de l'espace-temps, est une métrique de Minkowski. Une telle variété est appelée une *variété riemannienne*. Seule une telle métrique nous permet de définir un système inertiel local, c'est-à-dire un espace-temps de Minkowski local en chaque point de l'espace-temps. En particulier, nous avons

$$g_{ab} = 1/g^{ab} \quad \text{et} \quad g_a{}^b = g^a{}_b = \delta^a_b\ . \tag{233}$$

Comment la courbure et la métrique sont-elles reliées ? La solution à cette interrogation remplit généralement un grand nombre de pages dans les livres sur la relativité. Juste pour information, la relation est

$$R^a{}_{bcd} = \frac{\partial\Gamma^a{}_{bd}}{\partial x^c} - \frac{\partial\Gamma^a{}_{bc}}{\partial x^d} + \Gamma^a{}_{ec}\Gamma^e{}_{bd} - \Gamma^a{}_{fd}\Gamma^f{}_{bc}\ . \tag{234}$$

Le tenseur de courbure est construit à partir des dérivées secondes de la métrique. D'autre part, nous pouvons également déterminer la métrique si la courbure est connue. Une relation approchée est donnée ci-dessous.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

la courbure intrinsèque, nous concluons que si R s'annule dans une région l'espace-
Défi 290 pe temps dans cette région est plat. Nous déduisons facilement cette correspondance de cette deuxième définition*.

Une dernière manière de définir le tenseur R est la suivante. Pour un observateur *en chute libre*, la métrique g_{ab} est donnée par la métrique η_{ab} issue de la relativité restreinte. Dans son voisinage, nous avons

$$g_{ab} = \eta_{ab} + \frac{1}{3} R_{acbd} x^c x^d + O(x^3)$$
$$= \frac{1}{2} (\partial_c \partial_d g_{ab}) x^c x^d + O(x^3) \,. \tag{237}$$

Le terme de courbure décrit donc l'écart entre la métrique de l'espace-temps et celle de l'espace-temps plat. Le tenseur de courbure R est un énorme monstre : il possède $4^4 = 256$ composantes en chaque point de l'espace-temps. Cependant, ses propriétés de symétrie les réduisent à 20 nombres indépendants**. Les véritables nombres qui comptent dans les problèmes physiques sont encore moins nombreux, à savoir 10 uniquement. Ceux-ci sont les composantes du tenseur de Ricci, qui peut être défini à l'aide du tenseur de Riemann par contraction, c'est-à-dire en posant

$$R_{bc} = R^a{}_{bac} \,. \tag{240}$$

Ses composantes, comme celles du tenseur de Riemann, sont des inverses de longueurs au carré. Les valeurs du tenseur R_{bc}, ou celles de R^a_{bcd}, sont indépendantes de la con-
Défi 293 e vention de signe utilisée dans la métrique de Minkowski, par opposition à R_{abcd}.

* Cette deuxième définition est également appelée définition fondée sur la *déviation géodésique*. Il n'est bien entendu pas évident qu'elle coïncide avec la première. Pour une démonstration explicite, consultez
Réf. 164 la littérature. Il y a aussi une troisième manière, plus mathématique, de schématiser le tenseur R, à savoir la manière originale qu'utilisa Riemann pour l'introduire. Si nous appliquons un transport parallèle à un vecteur **w** autour d'un parallélogramme formé par deux vecteurs **u** et **v**, chacun de longueur ε, le vecteur **w** est transformé en $\mathbf{w} + \delta\mathbf{w}$. Nous avons alors

$$\delta\mathbf{w} = -\varepsilon^2 R \; \mathbf{u}\,\mathbf{v}\,\mathbf{w} + \quad \text{termes d'ordres supérieurs} \quad . \tag{236}$$

Vous pouvez en apprendre plus concernant la déviation géodésique en étudiant le comportement du fameux
Page 170 chariot qui indique le sud. Cet appareil, courant en Chine avant que le compas soit découvert, fonctionne uniquement si le monde est plat. En réalité, sur une surface courbe, après avoir parcouru une grande trajectoire fermée, il indiquera une direction différente de celle du début du voyage. Pouvez-vous expliquer
Défi 291 pe pourquoi ?

** La définition de la chute libre indique que le tenseur de Riemann est symétrique dans certains indices et
Défi 292 pe antisymétrique dans d'autres :

$$R_{abcd} = R_{cdab} \quad , \quad R_{abcd} = -R_{bacd} = -R_{abdc} \,. \tag{238}$$

Ces relations impliquent également que de nombreuses composantes s'annulent. La relation suivante est également importante

$$R_{abcd} + R_{adbc} + R_{acdb} = 0 \,. \tag{239}$$

Remarquez que l'ordre des indices n'est pas standardisé dans la documentation. La liste des invariants qui peuvent être confectionnés à partir de R est longue. Nous citerons que $\frac{1}{2}\varepsilon^{abcd} R_{cd}{}^{ef} R_{abef}$, à savoir le produit ${}^*R\,R$ du tenseur de Riemann avec son dual, est l'invariant caractérisant l'effet Thirring–Lense.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 71 Une photographie récente du ciel nocturne (© Axel Mellinger, de **?**)

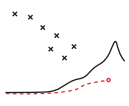
Pouvez-vous confirmer la relation $R_{abcd}R^{abcd} = 48m^2/r^6$ pour la solution de Schwarz-
Défi 294 pe schild ?

Curiosités et défis amusants sur la relativité générale

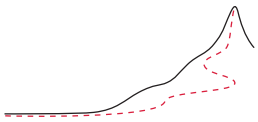
Pendant longtemps, les gens ont spéculé pour savoir pourquoi les satellites artificiels Pioneer 10 et 11, qui sont maintenant situés à plus de 70 unités astronomiques du Soleil, subissent une décélération constante de $8 \cdot 10^{-10}$ m/s^2 (en direction du Soleil) depuis qu'ils ont dépassé l'orbite de Saturne. Cet effet est appelé l'*anomalie Pioneer*. Son origine n'est pas claire et constitue toujours un sujet de recherches. Mais plusieurs études ont montré que la raison n'est *pas* une irrégularité par rapport à la dépendance en l'inverse du carré
Réf. 165 de la gravitation, comme il est parfois proposé. En d'autres termes, cet effet doit être d'origine électromagnétique.

Il existe plusieurs indices qui pointent vers une asymétrie dans l'émanation du rayonnement thermique. En réalité, une asymétrie d'avant en arrière de seulement 80 W est
Réf. 166 suffisante pour expliquer cet effet. (Les moteurs embarqués en produisent 2,5 kW.) Mais l'origine de cette asymétrie n'est pas encore bien comprise. La révélation de cette asymétrie – ou de toute autre explication de cette décélération – constitue l'un des défis de la
Défi 295 r physique spatiale moderne.

Page 94 Mettez-vous à l'épreuve : l'effet du moulin à lumière, à savoir que la lumière qui arrive
Défi 296 pe tire l'objet vers la source, pourrait-il être la raison qui expliquerait cet effet ?



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 5

POURQUOI POUVONS-NOUS CONTEMPLER LES ÉTOILES ? – LE MOUVEMENT DANS L'UNIVERS

> Zwei Dinge erfüllen das Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt : der bestirnte Himmel über mir und das moralische Gesetz in mir*.
>
> Emmanuel Kant (1724–1804)

Lors des nuits claires, entre deux mille et cinq mille étoiles sont visibles à l'œil nu. Plusieurs centaines d'entre elles ont un nom. En réalité, dans toutes les régions du monde, les étoiles et les constellations qu'elles forment sont considérées comme étant la mémoire des événements passés, et on raconte de nombreux récits à leur sujet**. Mais le simple fait que nous puissions *voir* les étoiles est le point de départ d'une histoire fabuleuse, plus extraordinaire encore que toutes ces légendes. Elle concerne presque tous les aspects de la physique moderne.

Quelles étoiles pouvons-nous admirer ?

> Démocrite affirme [à propos de la Voie lactée] qu'elle est une région où la lumière émane d'une multitude de petites étoiles situées à proximité les unes des autres, pour lesquelles le rassemblement engendre la clarté de l'ensemble.
>
> Aetius, *Opinions*.

Réf. 168

Les étoiles que nous observons par une nuit claire sont principalement les plus brillantes parmi les plus proches voisines de notre région de la Voie lactée. Elles se trouvent à des distances allant de quatre à quelques milliers d'années-lumière de nous. Globalement, il y a dans notre environnement en moyenne une étoile pour 400 années-lumière cubes.

Pratiquement toutes les étoiles visibles sont situées dans notre propre galaxie. Le seul objet extragalactique *constamment* visible à l'œil nu depuis l'hémisphère Nord est la

* « Deux choses remplissent le cœur d'une admiration et d'une vénération toujours nouvelles et toujours croissantes, à mesure que la réflexion s'y attache et s'y applique : le ciel étoilé au-dessus de moi et la loi morale en moi. »

Réf. 167

** Sur les mythes concernant les étoiles et les constellations, lisez par exemple l'ouvrage de G. Fasching, *Sternbilder und ihre Mythen*, Springer Verlag, 1993. Sur Internet nous trouvons également les magnifiques sites Web www.astro.wisc.edu/~dolan/constellations/ et www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sow.html.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 72 La nébuleuse d'Andromède M31, notre galaxie voisine (et 31e membre du catalogue Messier des objets célestes). (NASA)

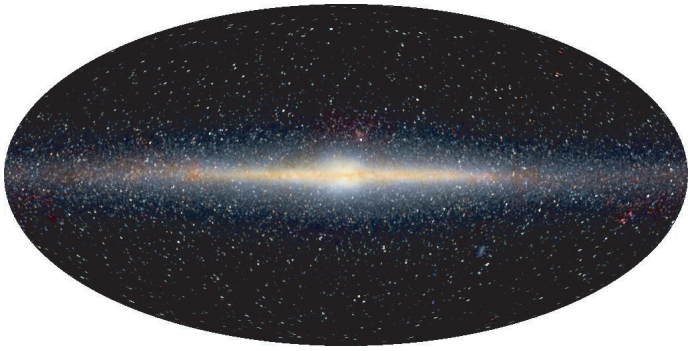


FIGURE 73 Comment notre galaxie apparaît dans l'infrarouge. (NASA)

nébuleuse d'Andromède, montrée agrandie sur la Figure 72. C'est une galaxie à part entière comme la nôtre, comme Emmanuel Kant l'avait déjà conjecturé en 1755. Plusieurs objets extragalactiques sont observables à l'œil nu depuis l'hémisphère Sud : la nébuleuse de la Tarentule, ainsi que le Grand et le Petit Nuage de Magellan. Les nuages de Magellan sont des galaxies voisines de la nôtre. D'autres exceptions temporaires sont les rares *novae*, des étoiles en explosion qui peuvent être vues si elles apparaissent dans des galaxies proches, ou les encore plus rares *supernovae*, qui peuvent souvent être aperçues même dans des galaxies lointaines.

En fait, les étoiles visibles sont également particulières par un autre aspect. Par exemple, les télescopes indiquent qu'environ la moitié d'entre elles sont doubles : elles sont constituées de deux étoiles tournant l'une autour de l'autre, comme dans le cas de Sirius. Le fait de mesurer les orbites qu'elles suivent dans leur folle course nous permet de déterminer leur masse. Pouvez-vous expliquer comment ?

Défi 297 pe

L'Univers est-il différent de notre Voie lactée ? Oui, il l'est, et plusieurs raisonnements permettent de le démontrer. Tout d'abord, notre galaxie – le mot *galaxie* est justement le terme grec original qui désigne la « Voie lactée » – est *aplatie*, à cause de sa rotation. Si la Galaxie tourne, il doit y avoir d'autres masses qui constituent l'arrière-plan par rapport auquel cette rotation s'effectue. En fait, il existe un nombre colossal d'autres galaxies – environ 10^{11} – dans l'Univers, une découverte qui date seulement du vingtième siècle.

Pourquoi notre compréhension de la place qu'occupe notre galaxie dans l'Univers

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 74 La galaxie elliptique NGC 205 (le 205e membre du New General Catalogue NGC). (NASA)

eut-elle lieu si tard ? Eh bien, les gens ont rencontré la même difficulté que lorsqu'ils ont tenté de déterminer la forme de la Terre. Ils ont dû comprendre que la Galaxie n'est pas seulement une traînée opaline que l'on voit lors de nuits dégagées, mais un véritable système physique, constitué d'environ 10^{11} étoiles gravitant les unes autour des autres*. Comme pour la Terre, on s'est aperçu que la galaxie possède une *forme* tridimensionnelle, elle est indiquée sur la Figure 73. Notre galaxie est une structure plate et circulaire, d'un diamètre de 100 000 années-lumière. Au centre, elle possède un bulbe sphérique. Elle effectue une rotation environ tous les 200 à 250 millions d'années. (Pouvez-vous deviner comment on la mesure ?) La rotation est plutôt lente : depuis que le Soleil s'est formé, il a accompli à peu près 20 à 25 tours complets seulement autour du centre.

Défi 298 pe

Il est même possible de mesurer la *masse* de notre galaxie. L'astuce consiste à utiliser un pulsar binaire situé dans sa périphérie. S'il est observé pendant de nombreuses années, nous pouvons déduire son accélération autour du centre galactique, puisque le pulsar réagit avec un décalage de fréquence qui peut être mesuré sur Terre. Plusieurs décennies d'observations sont nécessaires et un grand nombre d'artefacts doivent être éliminés. Malgré tout, de telles mesures sont en cours. Des estimations actuelles positionnent la masse de notre galaxie à 10^{42} kg ou $5 \cdot 10^{11}$ masses solaires.

Réf. 171

* On imaginait naguère que la Voie lactée, ou *galaxie* en grec, avait été créée lorsque Zeus, le principal dieu de la mythologie grecque, avait tenté de nourrir son fils Héraclès au sein d'Héra afin de le rendre immortel. Le jeune Héraclès, dans un signe annonciateur de sa force future, téta si fort que le lait divin se répandit dans le ciel en une traînée blanchâtre.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 75 Les galaxies M51 et M51B en collision (NASA), larges de 65 000 al, distantes de 31 Mal.

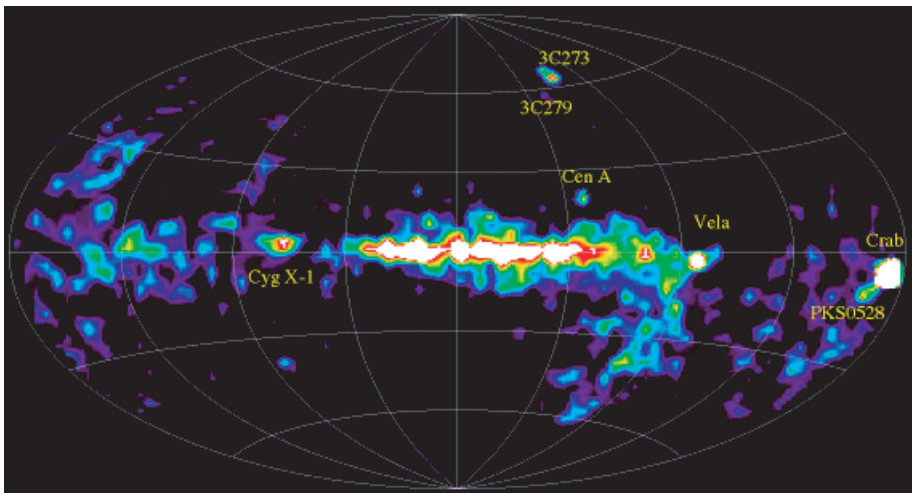


FIGURE 76 Les rayons X dans le ciel nocturne, entre 1 et 30 MeV. (NASA)

QUE VOYONS-NOUS LA NUIT ?

L'astrophysique nous conduit à une étrange conclusion concernant la matière, quelque peu différente de la manière de réfléchir que nous avons eue en physique classique : *la matière observée dans le ciel se trouve dans des nuages*. Les *nuages* sont des systèmes dans lesquels la densité de matière diminue avec la distance au centre, n'ayant ni frontière précise ni taille déterminée. La plupart des objets astrophysiques sont mieux décrits comme étant des nuages.

La Terre aussi est un nuage si nous prenons en compte, comme partie intégrante, son atmosphère, sa magnétosphère et l'anneau de poussières qui l'entourent. Le Soleil est un nuage. Pour commencer, c'est déjà une boule de gaz, mais il ressemble encore plus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

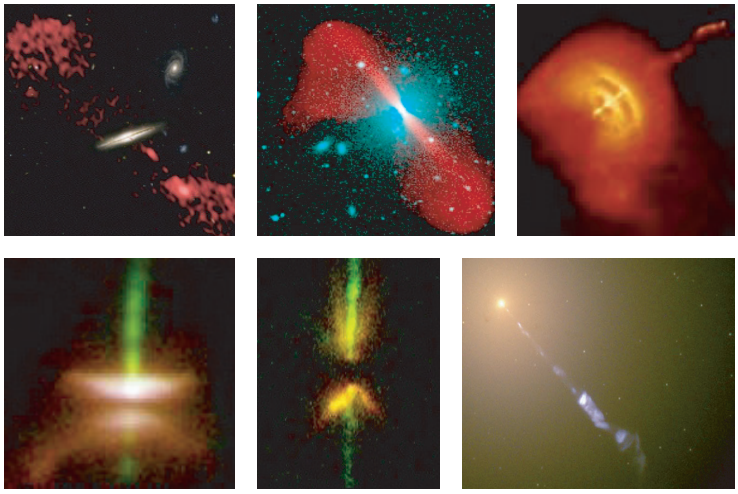


FIGURE 77 Des nuages en rotation émettant des jets le long de leurs axes. En haut : une image composite (visible et infrarouge) de la galaxie 0313-192, la galaxie 3C296 et le pulsar de Vela. En bas : l'étoile HH30 en formation, l'étoile DG Tauri B en formation, et un jet de trou noir issu de la galaxie M87. (Tous NASA)

à un nuage si nous prenons en considération ses protubérances, son héliosphère, le vent solaire qu'il provoque et sa magnétosphère. Le Système solaire est un nuage si nous considérons sa cohorte de comètes, sa ceinture d'astéroïdes et son nuage de gaz interstellaire. La Galaxie est un nuage si nous considérons sa distribution de matière et son halo de rayonnements cosmiques qui l'entourent. En fait, même les gens peuvent être considérés comme des nuages, puisque chaque personne est entourée de gaz, de petites particules de poussière près de la peau, de vapeur exhalée, etc.

Réf. 169 Dans l'Univers, presque tous les nuages sont des nuages de plasma. Un *plasma* est un gaz ionisé, tel que le feu, l'éclair, l'intérieur des tubes de néon, ou le Soleil. Au moins 99,9 % de toute *la matière de l'Univers se trouve sous la forme de nuages de plasma*. Seul un très faible pourcentage existe à l'état solide ou liquide, tels les grille-pains, les métros ou leurs usagers.

Les nuages dans l'Univers possèdent certaines propriétés en commun. Premièrement, les nuages observés dans l'Univers, lorsqu'ils ne sont pas perturbés par des collisions ou d'autres interactions provenant d'objets voisins, sont en *rotation*. La majorité des nuages sont par conséquent aplatis et prennent la forme de disques. Deuxièmement, dans nombre de nuages en rotation, la matière est en train de chuter vers le centre : la plupart des nuages sont des *disques d'accrétion*. Finalement, les disques d'accrétion non perturbés émettent généralement quelque chose le long de leur axe de rotation : ils accusent la présence de *jets*. Cette structure fondamentale de nuage a été observée pour des étoiles jeunes, pour des pulsars, pour des galaxies, pour des quasars et pour une foule d'autres systèmes. La Figure 77 en donne quelques exemples. (Le Soleil possède-t-il un jet ? La Voie lactée en a-t-elle un ? Jusqu'à présent, nous n'en avons détecté aucun – le champ est libre pour des découvertes futures.) Défi 299 r

En résumé, la nuit nous observons principalement des nuages de plasma aplatis en rotation émettant des jets suivant leurs axes. Une grande partie de l'astronomie et de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 170 l'astrophysique collecte des renseignements à leur sujet. Un tour d'horizon concernant ces observations en est donné dans le Tableau 4.

TABLEAU 4 Quelques observations sur l'Univers.

Aspect	Principales propriétés	Valeur
Phénomènes		
formation de galaxie	observée par Hubble	à maintes reprises
	événement déclencheur	inconnu
collisions galactiques	quantité de mouvement	10^{45} à 10^{47} kg m/s
formation stellaire	effondrement de nuage	donne naissance à des étoiles de 0,04 à 200 masses solaires
	fréquence	entre 0 et 1 000 masses solaires par an par galaxie, environ 1 masse solaire dans la Voie lactée
novae	nouvelles étoiles brillantes,	$L < 10^{31}$ W
	bulle d'éjection	$R \approx t \cdot c/100$
supernovae	nouvelles étoiles éclatantes,	$L < 10^{36}$ W
	taux	1 à 5 par galaxie pour 1 000 a
hypernovae	sursauts optiques	$L > 10^{37}$ W
sursauts gamma	luminosité	L allant jusqu'à 10^{45} W, environ 1 % de la luminosité de tout l'Univers visible
	énergie	env. 10^{46} J
	durée	env. 0,015 à 1 000 s
	quantité observée	env. 2 par jour
sources radio	émission d'ondes radio	10^{33} à 10^{38} W
sources de rayons X	émission de rayons X	10^{23} à 10^{34} W
rayons cosmiques	énergie	de 1 eV à 10^{22} eV
effet de lentille gravitationnelle	courbure de la lumière	angles allant jusqu'à 10^{-4} ″
comètes	réapparition, volatilisation	période typique 50 a, longévité typique de la visibilité 2 ka, durée de vie typique 100 ka
météorites	âge	jusqu'à $4{,}57 \cdot 10^{9}$ a
Composantes observées		
espace intergalactique	masse volumique	env. 10^{-26} kg/m^3
quasars	décalage vers le rouge	jusqu'à $z = 6$
	luminosité	$L = 10^{40}$ W, à peu près la même qu'une galaxie
superamas de galaxies	nombre de galaxies	env. 10^{8} à l'intérieur de notre horizon
notre superamas local	nombre de galaxies	environ 4 000

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Aspect	Principales propriétés	Valeur
groupes et amas de galaxies	taille	100 Zm
	nombre de galaxies	entre une douzaine et 100 (groupe)
		entre 100 et 1 000 (amas)
notre groupe local	nombre de galaxies	30
galaxies	taille	0,5 à 2 Zm
	nombre	env. 10^{11} dans l'horizon
	contenant	10 à 400 amas globulaires
	contenant	typiquement 10^{11} étoiles chacune
	contenant	typiquement un trou noir supermassif et plusieurs de masses intermédiaires
notre galaxie	diamètre	1,0(0,1) Zm
	masse	10^{42} kg ou $5 \cdot 10^{11}$ masses solaires Réf. 171
	vitesse	600 km/s en direction de l'Hydre-Centaure
	contenant	environ 30 000 pulsars Réf. 172
	contenant	100 amas globulaires ayant chacun 1 million d'étoiles
amas globulaires (ex. M15)	contenant	des milliers d'étoiles, un trou noir de masse intermédiaire
	âge	jusqu'à 12 Ga (plus anciens objets connus)
nébuleuses, nuages	composition	poussière, oxygène, hydrogène
notre nuage interstellaire local	taille	20 années-lumière
	composition	hydrogène atomique à 7 500 K
systèmes stellaires	types	étoiles binaires gravitantes, plus de 70 étoiles entourées par des naines brunes, plusieurs systèmes planétaires
notre Système solaire	taille	2 années-lumière (nuage d'Oort)
	vitesse	368 km/s du Verseau vers le Lion
étoiles	masse	jusqu'à 130 masses solaires (sauf lorsque des étoiles fusionnent) Réf. 173
géantes et supergéantes	taille colossale	jusqu'à 1 Tm
étoiles de la séquence principale		
naines brunes	petite masse	moins de 0,072 masse solaire
	température faible	moins de 2 800 K Réf. 174
naines L	température faible	1 200 à 2 800 K
naines T	température faible	900 à 1 100 K
naines blanches	petit rayon	$r \approx 5\,000$ km
	température élevée	refroidit de 100 000 jusqu'à 5 000 K
étoiles à neutrons	densité nucléaire	$\rho \approx 10^{17}$ kg/m^3

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Aspect	Principales propriétés	Valeur
	taille « minuscule »	$r \approx 10\,\mathrm{km}$
sources de jet		
objets compacts centraux		
sursauteurs X	émission de rayons X	
pulsars	émission radio périodique	
	masse	jusqu'à environ 25 masses solaires
magnétars	champs magnétiques hyper-puissants	jusqu'à 10^{11} T et plus Réf. 175
(sursauteurs gamma mou, pulsars X irréguliers)		
	masse	plus de 25 masses solaires Réf. 176
trous noirs	rayon de l'horizon	$r = 2GM/c^2$, masse observée variant de 1 à 100 millions de masses solaires
Propriétés générales		
horizon cosmique	distance	env. 10^{26} m = 100 Ym
expansion cosmique	constante de Hubble	$71(4)\,\mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$ ou $2{,}3(2)\cdot 10^{-18}\,\mathrm{s^{-1}}$
« âge » de l'Univers		13,7(2) Ga
vide	densité d'énergie	$0{,}5\,\mathrm{nJ/m^3}$ ou $\Omega_\Lambda = 0,73$ pour $k = 0$
		aucune preuve de dépendance temporelle
forme à grande échelle	courbure de l'espace	$k \approx \Omega_\mathrm{K} = 0$ Page 215
	topologie	simple dans notre environnement galactique, inconnue aux grandes échelles
dimensions	nombre	3 pour l'espace, 1 pour le temps, aux énergies faibles et modérées
matière	densité	2 à $11\cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg/m^3}$ ou 1 à 6 atomes d'hydrogène par mètre cube
		$\Omega_\mathrm{M} = 0,25$
baryons	densité	$\Omega_\mathrm{b} = 0,04$, un sixième de la précédente (incluse dans Ω_M)
matière noire	densité	$\Omega_\mathrm{MN} = 0,21$ (incluse dans Ω_M), inconnue
énergie sombre	densité	$\Omega_\mathrm{ES} = 0,75$, inconnue
photons	quantité volumique	4 à $5\cdot 10^8\,/\mathrm{m^3}$ = 1,7 à $2{,}1\cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg/m^3}$
	densité d'énergie	$\Omega_\mathrm{R} = 4{,}6\cdot 10^{-5}$
neutrinos	densité d'énergie	Ω_ν inconnue
température moyenne	photons	2,725(2) K
	neutrinos	non mesurée, valeur prédite de 2 K
fluctuations	anisotropie des photons	$\Delta T/T = 1\cdot 10^{-5}$
	amplitude de densité	$A = 0,8(1)$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 78 L'Univers est rempli de galaxies – cette photographie montre l'amas de Persée. (NASA)

ASPECT	PRINCIPALES PROPRIÉTÉS	VALEUR
	indice spectral	$n = 0,97(3)$
	rapport tensoriel/scalaire	$r < 0,53$ avec 95 % de certitude
profondeur optique de l'ionisation		$\tau = 0,15(7)$
découplage		$z = 1\,100$

Mais puisque nous sommes en train de parler de ce que nous voyons dans le ciel, nous devons élucider un problème plus général.

QU'EST-CE QUE L'UNIVERS ?

> « Je suis abasourdi par le nombre de personnes qui veulent « connaître » l'Univers alors qu'il est déjà suffisamment difficile de se repérer dans Chinatown. »
>
> Woody Allen

Le terme univers implique la rotation. L'Univers est ce qui tourne autour de nous la nuit. Pour un physicien, il existe au moins trois définitions distinctes du mot « Univers » :

— L'*Univers* (*visible*) représente la totalité de la masse et de l'énergie observables. Cela intègre tout ce qui est localisé à l'intérieur de l'horizon cosmologique. Puisque l'horizon est en train de s'éloigner de nous, la quantité de la masse et de l'énergie observables est en constante augmentation. Le contenu de l'expression « Univers visible »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

n'est donc pas figé dans le temps. (Quelle est la source de cette augmentation ? Nous reviendrons sur cette question plus tard.)

— L'*Univers* (*présumé*) représente la totalité de la masse et de l'énergie, *incluant* toutes celles qui ne sont pas visibles. De nombreux ouvrages sur la relativité générale stipulent qu'il existe certainement là de la matière ou de l'énergie située au-delà des frontières de l'observation. Nous expliquerons l'origine de cette conviction plus bas.

— L'*Univers* (*complet*) constitue la somme de la matière et de l'énergie *ainsi que* l'espace-temps lui-même.

On fait souvent l'amalgame entre ces définitions dans les débats physiques et philosophiques. Il n'existe *aucun* consensus unanimement accepté sur ces termes, ainsi nous devons être prudents. Dans ce livre, lorsque nous emploierons le mot « Univers », nous sous-entendrons uniquement la *dernière* définition. Nous découvrirons à plusieurs reprises que, sans une distinction claire et nette entre ces définitions, l'achèvement de l'ascension de la Montagne Mouvement deviendra impossible. (Par exemple, la quantité de matière et d'énergie contenue dans l'Univers complet est-elle la même que dans l'Univers visible ?)

Défi 300 pe

Remarquez que la « taille » de l'Univers visible ou, mieux, la distance à son horizon est une quantité qui *peut* être imaginée. La valeur de 10^{26} m ne surpasse pas toute imagination. Si nous prenons tout le fer qui se trouve dans le noyau terrestre et que nous le forgeons en un fil métallique qui s'étend jusqu'au bout de l'Univers visible, quelle épaisseur devrait-il avoir ? La réponse vous surprendra sans aucun doute. Aussi, le contenu de l'Univers est-il manifestement fini. Il y a à peu près autant de *galaxies* visibles dans l'Univers que de grains dans un mètre cube de sable. Pour prolonger cette comparaison, pouvez-vous déduire de quelle quantité d'espace vous auriez besoin pour déposer toute la farine que vous auriez si chaque petite particule de cette poudre représentait une étoile ?

Défi 301 pe

Défi 302 pe

La couleur et le mouvement des étoiles

« Ἤ τοι μὲν πρώτιστα Χάος γένετ' ...* »
Hésiode, *Théogonie*.

Manifestement, l'Univers est rempli de mouvement. Pour s'en faire une petite expérience, il est utile de mesurer la vitesse et la position du plus grand nombre possible d'objets. Au cours du vingtième siècle, une foule considérable d'observations fut obtenue sur les étoiles et les galaxies. (Pouvez-vous imaginer comment la distance et la vitesse sont déterminées ?) Cette profusion de données expérimentales peut être synthétisée en deux points.

Défi 303 s

Tout d'abord, aux grandes échelles, c'est-à-dire en moyenne sur environ cinq cents millions d'années-lumière, la densité de la matière dans l'Univers est *homogène* et *isotrope*. Évidemment, à des échelles plus petites, des inhomogénéités existent, telles que des galaxies, ou grumeaux. Notre galaxie par exemple n'est ni isotrope ni homogène. Mais

* « Au commencement était le Chaos... ». La *Théogonie*,, œuvre probable du poète mythique Hésiode, fut finalisée autour de 700 av. J.-C. Elle peut être lue en anglais et en grec sur le site www.perseus.tufts.edu, et en français sur http://remacle.org/bloodwolf/poetes/falc/hesiode/theogonie.htm. Cette célèbre sentence est tirée du vers 117.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

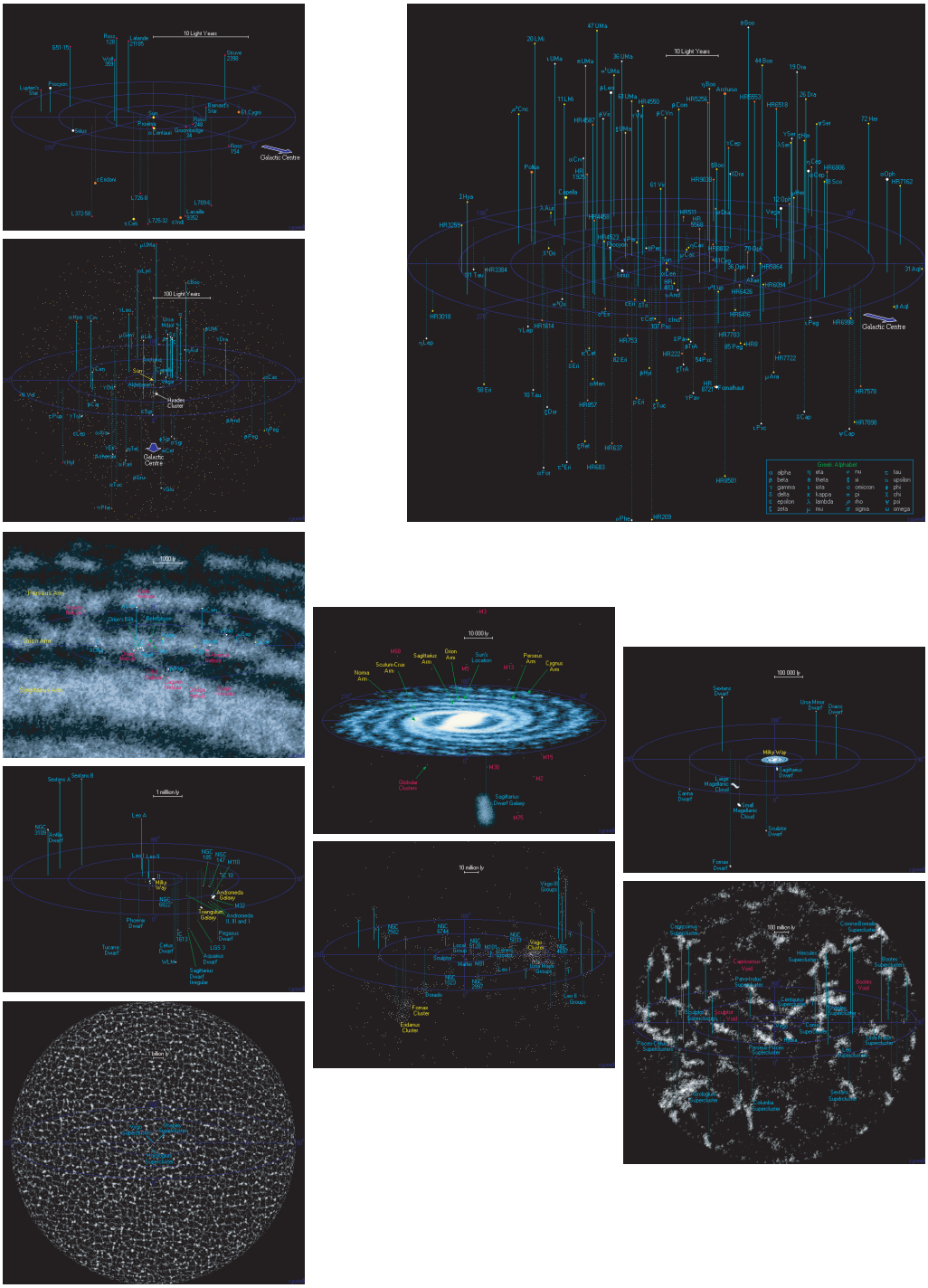


FIGURE 79 Un atlas de notre environnement cosmique : les illustrations ont une échelle de 12,5, 50, 250, 5 000, 50 000, 500 000, 5 millions, 100 millions, 1 milliard et 14 milliards d'années-lumière. (© Richard Powell, www.atlasoftheuniverse.com)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

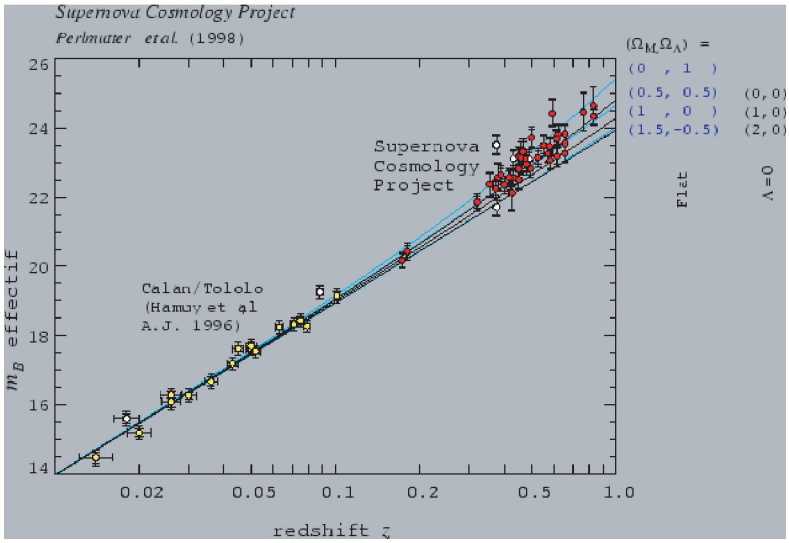


FIGURE 80 La relation entre la distance et la vitesse stellaire.

Réf. 177 aux grandes échelles les différences s'estompent. Cette homogénéité à grande échelle de la distribution de la matière est souvent dénommée le *principe cosmologique*.

Le deuxième point concernant l'Univers est encore plus important. Dans les années 1920, de manière indépendante, Carl Wirtz, Knut Lundmark et Gustaf Stromberg ont
Réf. 178 montré que, de façon générale, les galaxies s'éloignent de la Terre, et plus elles sont éloignées, plus elles s'éloignent vite. Il y a quelques exceptions pour des galaxies proches, telle la nébuleuse d'Andromède elle-même, mais globalement la vitesse de fuite v d'un objet augmente avec la distance d. En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble* publia la première mesure de la relation entre la vitesse et la distance. Bien qu'il fît usage d'échelles de longueur incorrectes, il trouva une relation

$$v = H\, d\ , \tag{241}$$

où la constante de proportionnalité H est aujourd'hui appelée la *constante de Hubble*. Un graphique de cette relation en est donné sur la Figure 80. Il s'avère que la constante de Hubble possède en ce moment une valeur d'environ 71 km s^{-1}Mpc^{-1}. (La propre valeur de Hubble était si éloignée de cette valeur qu'elle n'est jamais citée.) Par exemple, une étoile située à une distance de 2 Mpc** s'éloigne de la Terre avec une vitesse comprise autour de 142 km/s, et cette valeur est proportionnellement plus élevée pour des étoiles encore plus éloignées.

En fait, la découverte de Wirtz, Lundmark et Stromberg implique que chaque galaxie
Défi 304 pe s'éloigne de toutes les autres. (Pourquoi ?) En d'autres termes, la matière dans l'Univers est en *expansion*. L'échelle de cette expansion et les dimensions colossales concernées

* Edwin Powell Hubble (1889–1953) fut un important astronome américain. Après avoir été athlète puis avoir obtenu ses diplômes universitaires en droit, il retourna à sa passion de jeunesse pour les astres. Il démontra finalement la conjecture d'Emmanuel Kant de 1755 qui stipulait que la nébuleuse d'Andromède est une galaxie à part entière. Il montra ainsi que la Voie lactée n'est qu'une minuscule portion de l'Univers.

Page 289 ** Un *mégaparsec* ou Mpc représente une distance de 30,8 Zm.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sont prodigieuses. Le mouvement des milliers de millions de groupes de galaxies dans le ciel est décrit par l'unique équation (241) ! Certains écarts sont observés pour des galaxies proches, comme mentionné ci-dessus, et pour des galaxies lointaines, comme nous allons le voir bientôt.

Le principe cosmologique et l'expansion, pris ensemble, entraînent que l'Univers ne peut pas avoir existé avant l'instant où il avait une taille évanescente : l'Univers possède donc un *âge fini*. Combinée avec les équations d'évolution, comme il sera expliqué plus en détail ci-après, la constante de Hubble indique que son âge serait situé autour de 13 700 millions d'années. L'expansion signifie également que l'Univers possède un *horizon*, c'est-à-dire une distance maximale finie pour les sources dont les signaux peuvent parvenir à la Terre. Les signaux provenant des sources situées au-delà de l'horizon ne peuvent pas nous atteindre.

Puisque l'Univers est en expansion, il était beaucoup plus petit par le passé et donc beaucoup plus dense qu'il ne l'est actuellement. Il se révèle qu'il était également plus
Réf. 179 chaud. George Gamow* annonça en 1948 que, puisque des objets chauds rayonnent de la lumière, le ciel ne peut pas être parfaitement noir la nuit, mais doit être empli d'un rayonnement de corps noir émis lorsqu'il était « en chaleur ». Ce rayonnement, appelé *rayonnement de fond diffus cosmologique*, doit s'être refroidi du fait de l'expansion de l'Univers.
Défi 305 pe (Pouvez-vous entériner ce point ?) Malgré diverses prédictions similaires dues à d'autres initiateurs, dans un de ces exemples les plus célèbres de communication scientifique inefficace, le rayonnement fut découvert bien plus tard, par deux chercheurs complètement
Réf. 180 ignorants dans ce domaine de recherche. Un célèbre article de 1964 de Doroshkevich et Novikov avait même établi que l'antenne utilisée par les découvreurs ultérieurs (novices) était le meilleur dispositif pour débusquer ce rayonnement ! En tout cas, ce n'est qu'en 1965 qu'Arno Penzias et Robert Wilson découvrirent le signal. Ce fut lors d'une des plus admirables découvertes de la science, pour laquelle ils reçurent plus tard tous les deux le
Réf. 181 prix Nobel de physique. Il apparaît que ce rayonnement est décrit par le rayonnement de corps noir d'un corps ayant une température de 2,7 K. Cela découle de la loi du corps noir, avec une précision d'environ une partie pour 10^4.

Mais, excepté l'expansion et le refroidissement, les quatorze milliards d'années qui se sont écoulées ont également engendré quelques autres événements marquants.

LES ÉTOILES BRILLENT-ELLES TOUTES LES NUITS ?

> « Les étoiles ne brillent-elles pas merveilleusement ? Je suis l'unique personne dans le monde qui sait pourquoi il en est ainsi. »
> Friedrich (Fritz) Houtermans (1903–1966)

Les astres semblent avoir toujours existé. En réalité, de temps en temps, une nouvelle étoile apparaît dans le ciel : c'est une *nova*. La désignation est latine et signifie « nouveau ». Des novae particulièrement brillantes sont appelées *supernovae*. Les novae et les

* George Gamow (n. Odessa 1904 , d. Boulder 1968), physicien russo-américain, expliqua la radioactivité alpha comme un effet tunnel et prédit l'existence du fond diffus cosmologique micro-onde. Il rédigea les premiers ouvrages scientifiques de vulgarisation à succès, tels que *Un, deux, trois... l'infini* et la série des *Mr. Thompkins*, qui furent imités plus tard par de nombreux autres auteurs.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

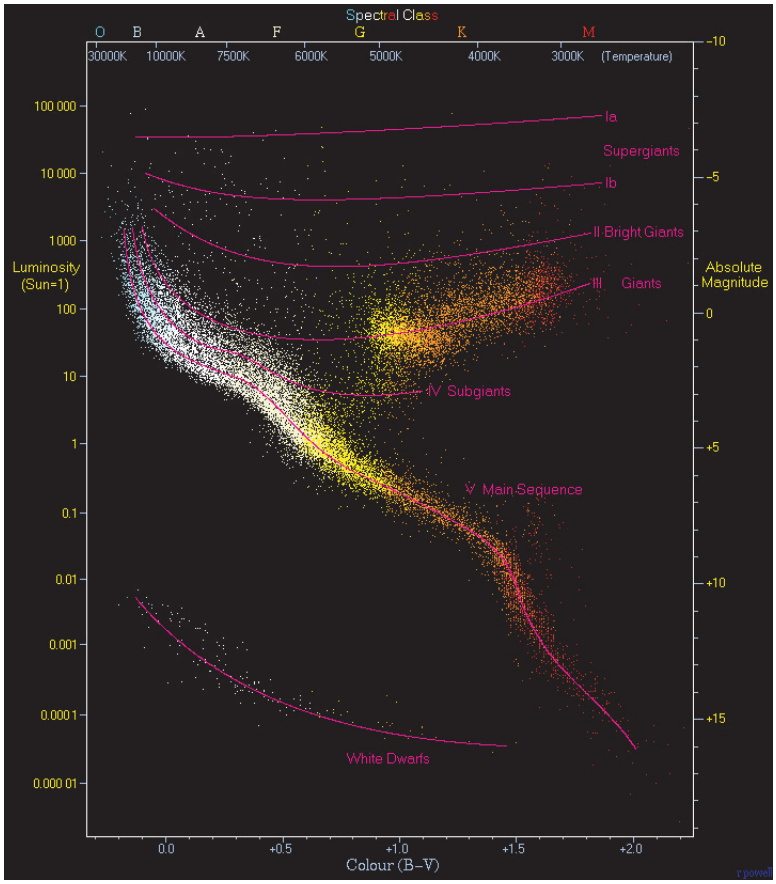


FIGURE 81 Le diagramme de Hertzsprung–Russell. (© Richard Powell)

phénomènes analogues nous rappellent que les astres vivent généralement beaucoup plus longtemps que les êtres humains, mais comme nous ils naissent et meurent.

Il apparaît que nous pouvons placer toutes les étoiles sur ce que nous appelons le *diagramme de Hertzsprung–Russell*. Ce diagramme, crucial dans chaque ouvrage d'astronomie, est représenté sur la Figure 81. C'est un magnifique exemple d'une méthode courante utilisée par les astrophysiciens : amasser des statistiques sur de nombreux exemplaires d'un type d'objet en particulier, puis pouvoir en déduire le cycle de vie de cet objet, bien que leur durée de vie soit considérablement plus importante que celle d'un homme. Par exemple, il est possible, par une utilisation intelligente de ce diagramme, d'estimer l'âge des amas stellaires, et ainsi d'aboutir à un âge minimum pour l'Univers. Le résultat est estimé à treize milliards d'années environ.

Une évidence saute aux yeux : puisque les étoiles brillent, elles *meurent* également. Les étoiles ne peuvent être observées que si elles sont nées mais n'ont pas encore disparu au moment de l'émission de lumière*. Cela conduit à des restrictions sur leur visibilité, particulièrement pour des décalages vers le rouge importants. En réalité, les télescopes

* En fait, l'auteur a voulu dire que les étoiles que l'on observe sont celles qui étaient encore vivantes quand elles ont émis la lumière, qui parvient sur la Terre au moment où on les observe. Mais, bien sûr, une étoile peut être déjà morte quand on la voit. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

modernes peuvent scruter des lieux (et des instants) si éloignés de l'instant présent qu'ils ne contiennent aucune étoile. À ces distances, nous ne pouvons observer que des quasars. Ce ne sont pas des étoiles, mais des systèmes beaucoup plus massifs et lumineux. Leur structure précise est encore étudiée par les astrophysiciens.

D'autre part, puisque les étoiles brillent, elles ont dû être *façonnées* d'une certaine manière. Les détails captivants de leur formation à partir de nuages de poussière représentent une partie majeure de l'astrophysique, mais ne sera pas explorée ici.

Nous n'avons pas encore la réponse complète à notre question. Après tout, pourquoi les étoiles brillent-elles ? Manifestement, elles brillent parce qu'elles sont chaudes. Elles sont chaudes à cause des réactions nucléaires qui se produisent dans leur cœur. Nous Page ?? discuterons de ces processus plus en détail dans le chapitre sur les noyaux.

UNE BRÈVE HISTOIRE DE L'UNIVERS

> « Anima scintilla stellaris essentiae*. »
> Héraclite d'Éphèse (v. 540 à v. 480 av. J.-C.) Réf. 182

Les aventures que l'Univers a vécues ou, mieux, les péripéties que la matière et le Réf. 183 rayonnement qui le composent ont expérimentées sont résumées dans le Tableau 5. Les étapes qui ne sont pas encore précisées seront étudiées dans la théorie quantique. Ce tableau chronologique possède des applications qu'aucun physicien théoricien n'aurait imaginées. La séquence est si élégante et si impressionnante que, de nos jours, elle est utilisée dans certaines psychothérapies pour rappeler aux gens toute l'histoire qui a eu lieu avant leur existence et pour leur faire apprécier l'importance de leur propre valeur. Profitez-en vous aussi.

TABLEAU 5 Une brève histoire de l'Univers.

Temps depuis aujourd'hui[a]	Temps depuis le Big Bang[b]	Événement	Température
$\approx 14 \cdot 10^9$ a	$\approx t_{\mathrm{Pl}}$ [b]	Temps, espace, matière et conditions initiales indéterminés	10^{32} K $\approx T_{\mathrm{Pl}}$
$13 \cdot 10^9$ a	v. 800 t_{Pl} $\approx 10^{-42}$ s	L'espace-temps se distingue de la matière et du rayonnement, conditions initiales déterminées	10^{30} K
	10^{-35} s à 10^{-32} s	Début de l'**inflation** & de l'**époque GUT**, les interactions forte et électrofaible divergent	$5 \cdot 10^{26}$ K
	10^{-12} s	Les antiquarks s'annihilent, les interactions faible et électromagnétique se séparent	10^{15} K
	$2 \cdot 10^{-6}$ s	Les quarks sont confinés dans les hadrons, l'Univers est un plasma	10^{13} K
		Annihilation des positrons	
	0,3 s	L'Univers devient transparent pour les neutrinos	10^{10} K
	quelques secondes	**Nucléosynthèse** : les *noyaux* D, ^{4}He, ^{3}He et ^{7}Li se forment, le rayonnement domine toujours	10^9 K

* « L'âme est un éclat de l'essence des étoiles. »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Temps depuis aujourd'hui[a]	Temps depuis le Big Bang[b]	Événement	Température
	2 500 a	La **domination de la matière** commence, les fluctuations de densité s'intensifient	75 000 K
$z = 1\,100$	380 000 a	**Recombinaison** : durant ces dernières étapes du Big Bang, les *atomes* de H, He et Li se forment, et l'Univers devient « transparent » pour la lumière, car la matière et le rayonnement se découplent, c'est-à-dire qu'ils acquièrent des températures différentes, le ciel « nocturne » commence à devenir de plus en plus sombre	3 000 K
		Le ciel est presque noir, sauf pour le rayonnement de corps noir	$T_\gamma = T_o(1+z)$
$z = 10$ à 30		**Formation des galaxies**	
$z = 6$		Les plus vieux objets observés jusqu'à présent	
$z = 5$		Formation des amas de galaxies	
$z = 3$	10^6 a	La première génération d'étoiles (population II) est formée, démarrage de la fusion de l'hydrogène, la fusion de l'hélium produit le carbone, le silicium et l'oxygène	
	$2 \cdot 10^9$ a	Les premières étoiles explosent en supernovae[c], le fer est produit	
$z = 1$	$3 \cdot 10^9$ a	La deuxième génération d'étoiles (population I) apparaît et les explosions ultérieures de supernovae issues des étoiles en fin de vie forment le reste des éléments (Fe, Se, etc.) dont nous sommes constitués et les dispersent dans la galaxie	
$4{,}7 \cdot 10^9$ a		Nuages primitifs, nés des vestiges de ces explosions, effondrements, formation du Soleil	
$4{,}6 \cdot 10^9$ a		**Formation de la Terre** et des autres planètes : début de l'Azoïque	
$4{,}3 \cdot 10^9$ a		Les cratères se forment sur les planètes	
$4{,}0 \cdot 10^9$ a		La Lune se forme à partir de la matière éjectée au cours de la collision d'un gros astéroïde avec la Terre, encore liquide	
$4{,}0 \cdot 10^9$ a		Début de l'éon **archéen** (Archaeozoicum) : le bombardement spatial cesse, la croûte terrestre se solidifie, les plus anciens minerais se forment, l'eau se condense	
$3{,}5 \cdot 10^9$ a		La vie (microscopique) unicellulaire apparaît, les stromatolithes se forment	
$2{,}5 \cdot 10^9$ a		Début de l'éon **protérozoïque** (« âge de la première vie ») : l'atmosphère devient riche en oxygène grâce à l'activité des micro-organismes Réf. 184	

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Temps depuis aujourd'hui[a]	Temps depuis le Big Bang[b]	Événement	Température
$1 \cdot 10^9$ a		La vie multicellulaire, macroscopique apparaît	
$800 \cdot 10^6$ a		La Terre est entièrement recouverte de glace pour la première fois (pour une raison toujours inconnue) Réf. 185	
600 à $540 \cdot 10^6$ a		La Terre est entièrement recouverte de glace pour la dernière fois	
$540(5) \cdot 10^6$ a		L'ère **paléozoïque** (Palaeozoicum, « âge de la vie ancienne ») commence, après une gigantesque période glaciaire : les animaux apparaissent, les plus anciens fossiles (avec 540(5) début des périodes Cambrien, 495(5) Ordovicien, 440(5) Silurien, 417(5) Dévonien, 354(5) Carbonifère et 292(5) Permien)	
$450 \cdot 10^6$ a		Les plantes terrestres apparaissent	
$370 \cdot 10^6$ a		Les arbres à bois apparaissent	
$250(5) \cdot 10^6$ a		L'ère **mésozoïque** (Mesozoicum, « âge de la vie moyenne », anciennement appelé ère secondaire) commence : la majorité des insectes et des autres formes de vie sont exterminés, les mammifères apparaissent (avec 250(5) début des périodes Trias, 205(4) Jurassique et 142(3) Crétacé)	
$150 \cdot 10^6$ a		Le continent de la Pangée se disloque en Laurasie et Gondwana	
		L'amas d'étoiles des Pléiades se forme	
$150 \cdot 10^6$ a		Les oiseaux apparaissent	
$142(3) \cdot 10^6$ a		La période glorieuse des dinosaures (Crétacé) débute	
$100 \cdot 10^6$ a		Début de la formation des Alpes, des Andes et des montagnes Rocheuses	
$65{,}5 \cdot 10^6$ a		L'ère **cénozoïque** (Caenozoicum, « âge de la nouvelle vie ») commence : les dinosaures disparaissent après qu'un astéroïde a frappé la Terre au Yucatán, les primates apparaissent (avec 65,5 début du Tertiaire, constitué de la période du Paléogène avec les époques Paléocène, 55,0 Éocène et 33,7 Oligocène, et de la période du Néogène avec les époques 23,8 Miocène et 5,32 Pliocène, puis 1,81 la période du Quaternaire avec les époques du Pléistocène (ou Diluvium) et 0,01 Holocène (ou Alluvium))	
$50 \cdot 10^6$ a		Les grands mammifères apparaissent	
$7(1) \cdot 10^6$ a		Les hominidés apparaissent	

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TEMPS DEPUIS AUJOURD'HUI[a]	TEMPS DEPUIS LE BIG BANG[b]	ÉVÉNEMENT	TEMPÉRATURE
$3 \cdot 10^6$ a		Explosions des supernovae, avec les conséquences que l'on sait : rayonnement cosmique plus intense, taux de formation des nuages plus élevé, la Terre se refroidit vigoureusement, forte pression évolutionnaire sur les hominidés et, comme conséquence, le genre Homo apparaît Réf. 186	
500 000 a		Formation des étoiles les plus jeunes dans la Galaxie	
500 000 a		Homo sapiens apparaît	
100 000 a		Début de la dernière période glaciaire	
90 000 a		Homo sapiens sapiens apparaît	
11 800 a		Fin de la dernière période glaciaire, début de l'Holocène	
6 000 a		Premiers textes écrits	
2 500 a		La physique naît	
500 a		Consommation du café, usage du crayon et naissance de la physique moderne	
200 a		Début de l'usage de l'électricité	
100 a		Einstein publie	
10 à 120 a		Vous êtes un être unicellulaire	
présent	v. $14 \cdot 10^9$ a	Vous êtes en train de lire ce livre	$T_\gamma = 2{,}73$ K, $T_\nu \approx 1{,}6$ K, $T_\mathrm{b} \approx 0$ K
futur		Vous aimez la vie ; pour savoir précisément pourquoi, lisez la page 154	

a. La coordonnée temporelle utilisée ici est celle donnée par le système de coordonnées défini par le rayonnement de fond diffus micro-onde, comme expliqué à la page 217. Une année est abrégée « a » (du latin « annus »). Les marges d'erreur dans la précision des derniers chiffres sont données entre parenthèses.
b. Cette quantité n'est pas exactement définie puisque le Big Bang ne constitue pas un événement de l'espace-temps. Nous en dirons plus à ce sujet à la page **??**.
c. L'histoire des atomes sur la Terre montre que nous sommes constitués des résidus d'une supernova. Nous sommes vraiment faits de *poussières d'étoiles*.

L'échelle des temps géologiques est celle donnée par la Commission internationale de stratigraphie, les temps sont mesurés par le truchement de méthodes de datation radiométriques (dites « par radiochronologie », c'est-à-dire en utilisant la radioactivité [N.D.T.]).

Malgré sa longueur et son intérêt, ce tableau possède ses limites. Par exemple, que s'est-il passé partout ailleurs dans le dernier milliard d'années ? Il reste encore plein de choses à écrire pour lesquelles nous ne savons presque rien. Pour des raisons évidentes, les investigations ont été plutôt centrées sur la Terre.

La recherche en astrophysique s'est focalisée sur la découverte et la compréhension de tous les phénomènes observés dans les cieux. Nous abandonnons ici un large pan de ce domaine palpitant puisque, du reste, nous voulons nous concentrer sur le mouvement.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

De manière intéressante, la relativité générale nous permet de trouver une explication pour un grand nombre d'observations globales sur le mouvement dans l'Univers.

L'HISTOIRE DE L'ESPACE-TEMPS

> Un grand nombre de lapins s'enfuient d'une position centrale, dans diverses directions, tous avec la même vitesse. Durant la course, un seul lapin tourne la tête, et fait une observation renversante. Que voit-il ?

Défi 306 s

Les données indiquant que l'Univers est de toutes parts saupoudré d'étoiles conduisent à une conclusion élémentaire : l'Univers ne peut pas être statique. La gravitation modifie constamment les distances entre les corps, la seule exception étant les orbites circulaires. La gravitation modifie également les distances *moyennes* entre les corps : elle tente toujours de faire effondrer les nuages. Le plus grand nuage parmi tous, celui formé par toute la matière dans l'Univers, doit par conséquent ou être en train de s'effondrer, ou être encore en expansion.

Réf. 187

Le premier qui osa esquisser cette conclusion fut Aleksander Friedmann*. En 1922 il déduisit l'évolution détaillée de l'Univers dans le cas d'une distribution de masse homogène et isotrope. Son calcul est un exemple classique de raisonnement simple mais puissant. Pour un Univers qui est homogène et isotrope en chaque point, l'élément linéaire est donné par

Défi 307 pe

$$\mathrm{d}s^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - a^2(t)(\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2) \tag{242}$$

et la matière est décrite par une masse volumique ρ_M et une pression p_M. En insérant tout cela dans les équations du champ, nous obtenons deux équations

$$\left(\frac{\dot a}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho_\mathrm{M} + \frac{\Lambda}{3} \quad \text{et} \tag{243}$$

$$\ddot a = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_\mathrm{M} + 3p_\mathrm{M})\, a + \frac{\Lambda}{3}\, a \tag{244}$$

qui impliquent

$$\dot\rho_\mathrm{M} = -3\frac{\dot a}{a}(\rho_\mathrm{M} + p_\mathrm{M})\,. \tag{245}$$

À l'instant présent t_0, la pression de la matière est négligeable. (Dans la suite, l'indice 0 se réfère à l'instant présent.) Dans ce cas, l'expression $\rho_\mathrm{M} a^3$ est constante au cours du

* Aleksander Aleksandrowitsch Friedmann (1888–1925) était un physicien russe qui avait prédit l'expansion de l'Univers. Suite à son décès prématuré du typhus, son travail demeura principalement inconnu jusqu'à ce que Georges A. Lemaître (n. Charleroi 1894 , d. Louvain 1966), prêtre belge et cosmologiste, l'ait compris et ait développé son travail en 1927, se concentrant, comme l'exigeait sa tâche, sur des solutions dotées d'une singularité initiale. Lemaître est l'un de ceux qui ont promulgué l'idée (fausse !) que le Big Bang est un « événement » de la « création » et il a réussi à en convaincre toute la profession. Les solutions de Friedmann–Lemaître sont souvent incorrectement baptisées d'après deux autres physiciens, qui les étudièrent une nouvelle fois bien plus tard, en 1935 et 1936, à savoir H.P. Robertson et A.G. Walker.

Page 225, page 226

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

temps.

Les équations (243) et (244) ne dépendent que de deux constantes de la nature : la constante gravitationnelle G, associée à la force ou puissance maximale dans la nature, et la constante cosmologique Λ, qui décrit la densité d'énergie du vide ou, si nous préférons, la force minimale dans la nature.

Avant que nous discutions de ces équations, précisons d'abord certains points concernant le vocabulaire utilisé. On a coutume d'exprimer toutes les masses volumiques en
Défi 308 pe fonction de ce que nous appelons la *densité critique* ρ_c, donnée par

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx (8 \pm 2) \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg/m^3} \tag{246}$$

correspondant à environ 8, plus ou moins 2, atomes d'hydrogène par mètre cube. Sur Terre, nous appellerions cette valeur un *vide* extrêmement poussé. Voilà à quoi ressemblent globalement les différences qui existent entre la vie quotidienne et l'Univers tout entier. Dans tous les cas, la densité critique caractérise une distribution de matière conduisant à une évolution de l'Univers située juste à la frontière entre l'expansion perpétuelle et l'effondrement. En fait, cette densité est critique uniquement dans le cas d'une constante cosmologique *nulle*, et conduit à une évolution que nous qualifions de *limite*. Malgré cette restriction, le terme est maintenant employé dans cette expression également pour toutes les autres situations. Nous parlons donc de masses volumiques sans dimensions Ω_M définies comme

$$\Omega_M = \rho_0/\rho_c \,. \tag{247}$$

La constante cosmologique peut également être reliée à cette densité critique en posant

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G \rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} \,. \tag{248}$$

Un troisième paramètre sans dimension Ω_K décrit la courbure de l'espace. Il est défini en fonction du rayon actuel de l'Univers R_0 et de la constante de courbure $k = \{1, -1, 0\}$ comme

$$\Omega_K = \frac{-k}{R_0^2\, H_0^2} \tag{249}$$

et son signe est opposé à celui de la courbure k, Ω_K s'annulant pour une courbure nulle. Remarquez qu'un Univers positivement courbé, s'il est homogène et isotrope, est nécessairement fermé et de volume fini. Un Univers plat ou négativement courbé ayant la même distribution de matière peut être ouvert, c'est-à-dire de volume infini, mais pas nécessairement. Il peut être simplement ou multiplement connexe. Dans ces situations, la topologie n'est pas entièrement fixée par la courbure.

Le paramètre de Hubble de l'instant présent est défini par $H_0 = \dot{a}_0/a_0$. À partir de
Défi 309 pe l'équation (243), nous obtenons alors la relation majeure

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1 \,. \tag{250}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

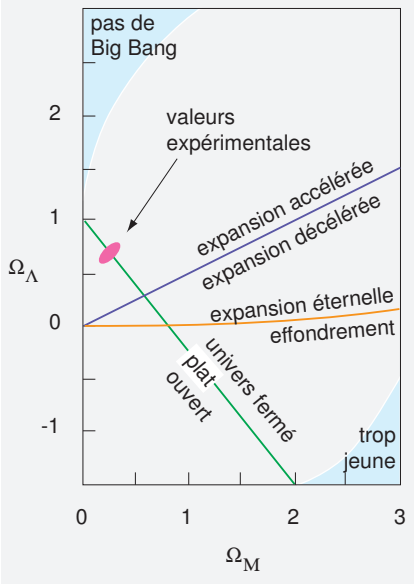


FIGURE 82 L'étendue des valeurs possibles pour les paramètres Ω et leurs conséquences.

Par le passé, alors que les données manquaient, les physiciens étaient partagés en deux camps : les *claustrophobes*, qui pensaient que $\Omega_K > 0$, et les *agoraphobes*, qui étaient persuadés que $\Omega_K < 0$. Nous allons bientôt donner plus de détails concernant les valeurs mesurées de ces paramètres. Le diagramme de la Figure 82 indique les intervalles les plus intéressants pour ces paramètres et les comportements correspondants de l'Univers.

Pour le paramètre de Hubble, les mesures les plus récentes donnent une valeur de

$$H_0 = 71 \pm 4\,\mathrm{km/sMpc} = 2{,}3 \pm 2 \cdot 10^{-18}\,/\mathrm{s} \tag{251}$$

ce qui correspond à un Univers âgé de $13{,}7 \pm 2$ milliards d'années. En d'autres termes, cet âge déduit de l'histoire de l'espace-temps s'accorde avec l'âge, donné plus haut, retrouvé à partir de l'histoire des astres.

Pour avoir une idée de la manière dont l'Univers évolue, on a coutume de faire appel à ce que nous appelons le *paramètre de décélération* q_0. Il est défini par

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0}{a_0 H_0^2} = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda\,. \tag{252}$$

Le paramètre q_0 est positif si l'expansion est en cours de ralentissement, négatif si l'expansion s'accélère. Ces possibilités sont aussi indiquées sur le diagramme.

Une manière encore plus claire de schématiser l'expansion de l'Univers pour une pression nulle consiste à réécrire l'équation (243) en utilisant $\tau = t\,H_0$ et $x(\tau) = a(t)/a(t_0)$,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

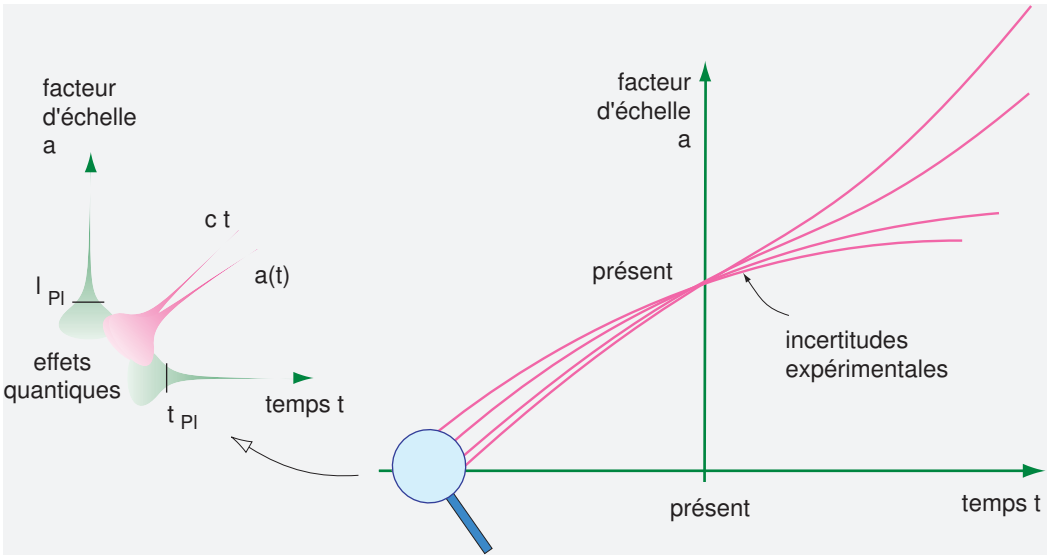


FIGURE 83 Évolution de l'échelle a de l'Univers pour différentes valeurs de densités.

conduisant à

$$\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau}\right)^2 + U(x) = \Omega_{\mathrm{K}}$$
$$\text{avec } U(x) = -\Omega_\Lambda x - \Omega_\Lambda x^2 \tag{253}$$

Cela ressemble à l'équation de l'évolution du mouvement d'une particule de masse 1, ayant une énergie totale Ω_{K}, dans un potentiel $U(x)$. Les évolutions résultantes sont facilement déduites.

Pour Ω_Λ nul, soit l'Univers se dilate pour toujours, soit il s'effondre, en fonction de la valeur de la densité de masse–énergie.

Pour Ω_Λ non nul (positif), le potentiel possède exactement un maximum ; si la particule a suffisamment d'énergie pour grimper jusqu'à ce maximum, elle accélérera continuellement. C'est la situation que l'Univers semble avoir aujourd'hui.

Pour un intervalle de temps prédéfini, le résultat est indiqué sur la Figure 83. Il faut souligner deux points : d'abord, l'ensemble des courbes possibles est décrit par *deux* paramètres, et non pas un. De plus, les lignes ne peuvent pas être tracées à partir d'une taille nulle. Il existe deux raisons principales à cela : nous ne comprenons pas encore très bien le comportement de la matière aux très hautes énergies, et nous ne maîtrisons pas le comportement de l'espace-temps aux énergies très élevées. Nous reviendrons sur ce problème important plus loin.

La principale conclusion que nous pouvons tirer du travail de Friedmann est qu'un Univers homogène et isotrope *n'est pas statique* : soit il se dilate, soit il se contracte. Dans les deux cas, il possède un *âge fini*. Il fallut de nombreuses années avant que cette idée profonde soit largement acceptée dans la communauté des cosmologistes. Même Einstein mit beaucoup de temps avant de s'y accoutumer.

Remarquez qu'en raison de son expansion isotrope l'Univers possède un référentiel

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

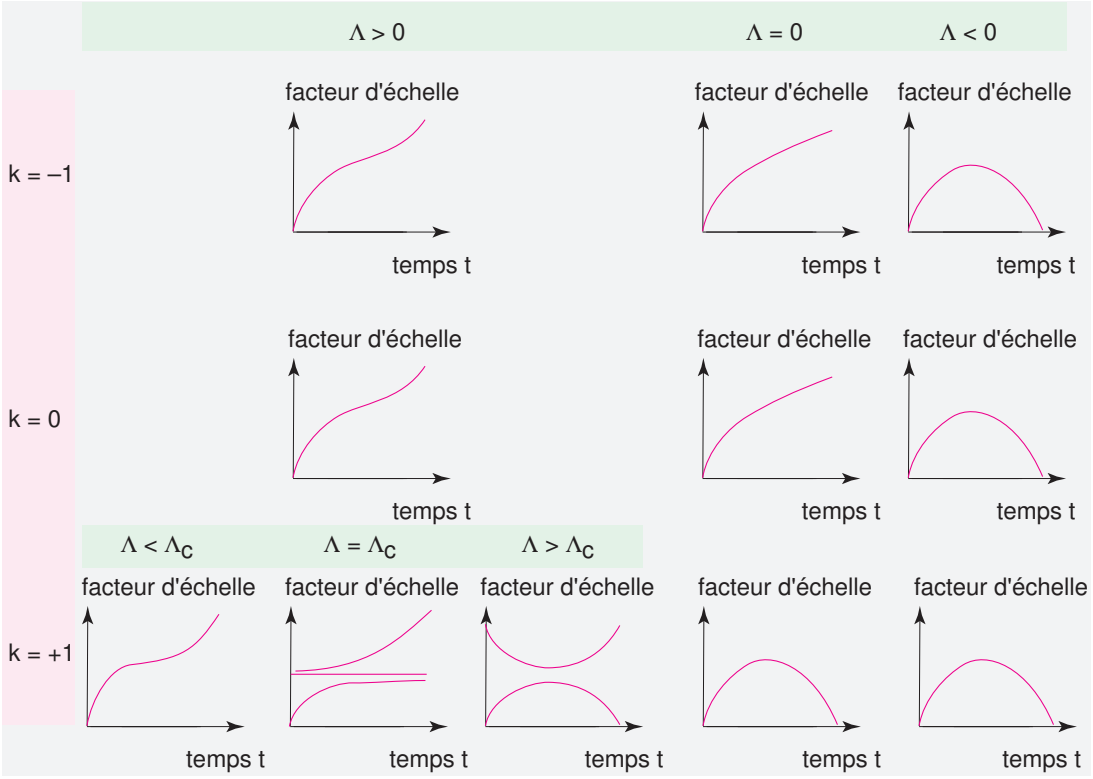


FIGURE 84 L'évolution à long terme du facteur d'échelle a de l'Univers pour divers paramètres.

de prédilection : le référentiel défini par la répartition moyenne de matière. Le temps mesuré dans ce référentiel est le temps listé dans le Tableau 5, qui est celui que nous utilisons implicitement lorsque nous parlons de l'*âge* de l'Univers.

Un tour d'horizon des éventualités concernant l'évolution à long terme est donné par la Figure 84. L'évolution peut avoir diverses issues. Au début du vingtième siècle, les gens choisissaient parmi elles selon leurs préférences personnelles. Albert Einstein donnait la primeur à la solution $k = 1$ et $\Lambda = a^{-2} = 4\pi G\rho_M$. C'est la solution instable rencontrée lorsque $x(\tau)$ culmine au maximum du potentiel $U(x)$.

En 1917, le physicien hollandais Willem de Sitter avait trouvé, à la grande stupeur d'Einstein, qu'un Univers vide avec $\rho_M = p_M = 0$ et $k = 1$ est également possible. Ce
Défi 310 pe type d'Univers se dilate pendant des durées très longues. L'Univers de de Sitter indique que, dans des cas particuliers, la matière n'est pas nécessaire pour que l'espace-temps puisse exister.

Lemaître avait trouvé des Univers en expansion pour une masse positive, et ses résultats furent également contestés, à commencer par Einstein. Lorsque plus tard les premières mesures confirmèrent ces calculs, l'idée d'un Univers massif et en expansion se généralisa peu à peu. Il devint le modèle standard de la cosmologie dans les manuels. Cependant, dans une sorte d'aveuglement collectif qui a perduré de 1950 à 1990 environ, presque tout le monde croyait que $\Lambda = 0$*. Ce n'est que vers la fin du vingtième siècle que

Défi 311 pe * Dans ce cas, pour $\Omega_M \geqslant 1$, l'âge de l'Univers vérifie $t_0 \leqslant 2/(3H_0)$, où les limites sont compatibles. Pour

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

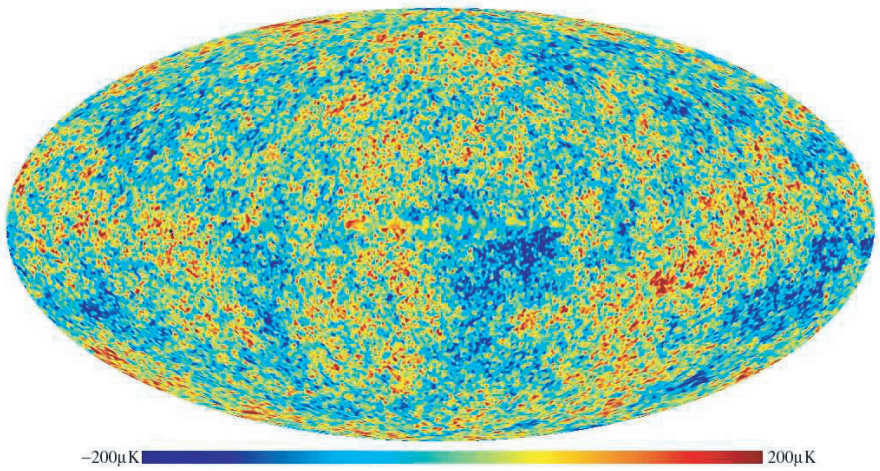


FIGURE 85 Les fluctuations du rayonnement de fond cosmologique. (WMAP/NASA)

les progrès expérimentaux nous permirent de faire des déductions fondées sur l'évidence rationnelle plutôt que sur des croyances ou des préférences personnelles, comme nous allons bientôt le découvrir. Mais avant toutes choses nous devons faire toute la lumière sur une vieille controverse.

POURQUOI LE CIEL EST-IL NOIR LA NUIT ?

> « In der Nacht hat ein Mensch nur ein Nachthemd an, und darunter kommt gleich der Charakter*. »
> Robert Musil

En premier lieu, le ciel nocturne n'est pas noir. Il possède la même couleur intrinsèque que durant le jour, comme n'importe quelle photographie à longue pose le démontre. (Regardez, par exemple, la Figure 67.) Mais cette couleur, comme la couleur du ciel au cours de la journée, n'est pas due à la température de la voûte céleste, mais à la lumière diffuse provenant des étoiles. Si nous voulons rechercher la véritable couleur du ciel, nous avons besoin d'inspecter son rayonnement thermique. En réalité, les mesures indiquent que même le ciel vidé de sa substance n'est pas complètement froid ou noir la nuit. Il est rempli d'un rayonnement d'environ 200 GHz. Des relevés plus précis montrent que ce rayonnement correspond à l'émission thermique d'un corps noir à 2,73 K. Ce *rayonnement de fond cosmologique* représente le rayonnement thermique résiduel provenant du Big Bang.

Réf. 188 L'Univers est en réalité plus froid que les étoiles. Mais pourquoi en est-il ainsi ? Si l'Univers était homogène à grande échelle et infiniment grand, il aurait un nombre infini d'étoiles. En regardant dans n'importe quelle direction, nous verrions la surface d'une étoile. Le ciel nocturne serait alors aussi lumineux que la surface du Soleil ! Pouvez-vous Défi 312 s convaincre votre grand-mère avec ce raisonnement ?

une densité nulle, nous avons $t_0 = 1/H_0$.

* « La nuit, un homme ne porte qu'une chemise de nuit, et directement sous celle-ci se cache sa véritable nature. » Robert Musil (n. Klagenfurt 1880 , d. Genève 1942) fut un écrivain allemand.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Dans une forêt profonde, nous remarquons qu'il y a un arbre dans toutes les directions. De manière analogue, dans un Univers « profond », nous devrions voir une étoile dans chaque direction. À présent, l'étoile moyenne possède une température de surface d'environ 6 000 K. Si nous vivions dans un Univers vieux et profond, nous vivrions effectivement à l'intérieur d'un four ayant une température avoisinant les 6 000 K, ce qui nous empêcherait de profiter d'une bonne glace à la crème.

Ce paradoxe fut formulé de manière plus précise en 1823 par l'astronome Wilhelm Olbers*. Comme ce dernier avait considérablement débattu de cette question, il est également dénommé *paradoxe d'Olbers*. Aujourd'hui nous savons que, même si toute la matière contenue dans l'Univers était convertie en rayonnement, l'Univers ne serait toujours pas aussi brûlant que nous venons de l'estimer. Autrement dit, la puissance et la longévité des étoiles sont beaucoup trop faibles pour engendrer la fournaise lumineuse
Réf. 189 que nous venons de citer. Donc quelque chose ne colle pas.

En fait, deux effets principaux peuvent être invoqués pour contourner cette contradiction. Premièrement, puisque l'Univers possède un âge limité, les étoiles éloignées brillent depuis peu. Nous les voyons à une époque où elles étaient plus jeunes ou même pendant leur formation, lorsqu'elles étaient plus sombres. Par conséquent, la part de la luminosité des étoiles distantes est plus petite que celle des étoiles proches, de telle façon que la température moyenne du ciel s'en trouve diminuée d'autant**. Deuxièmement, nous pourrions imaginer que le rayonnement des étoiles distantes est décalé vers le rouge et que le volume que le rayonnement devrait remplir est en constante augmentation, de telle sorte que la température moyenne du ciel est également réduite.

Des calculs sont nécessaires pour déterminer quel effet est plus important que l'autre.
Réf. 190 Ce problème a été étudié avec beaucoup de soin par Paul Wesson, qui expliqua que le premier effet est plus important que le second d'un facteur trois environ. Nous pouvons donc affirmer convenablement que le ciel nocturne est noir *principalement* parce que l'Univers possède un âge fini. Nous pouvons ajouter que le ciel serait légèrement plus lumineux si l'Univers n'était pas en expansion.

Réf. 188 De plus, l'obscurité du ciel est possible uniquement parce que la vitesse de la lumière
Défi 314 pe est finie. Pouvez-vous confirmer cette idée ?

Finalement, l'obscurité du ciel nous rappelle également que l'Univers possède un âge *important* (mais fini). En réalité, le rayonnement de fond de 2,7 K est si froid, bien qu'il ait été émis à 3 000 K, parce qu'il est décalé vers le rouge suite à l'effet Doppler. En faisant
Réf. 191 des hypothèses raisonnables, on trouve que la température T de ce rayonnement varie avec le facteur d'échelle $R(t)$ de l'Univers comme

$$T \sim \frac{1}{R(t)} \,. \tag{254}$$

* Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (n. Arbergen 1758 , d. Brême 1840) était astronome. Il découvrit deux planétoïdes, Pallas et Vesta, et cinq comètes. Il développa la méthode de calcul des orbites paraboliques pour les comètes qui est toujours utilisée aujourd'hui. Olbers encouragea également activement le mathématicien
Page 102 et astronome Friedrich Wilhelm Bessel dans le choix de sa profession. Le paradoxe est baptisé d'après Olbers, bien que d'autres aient fait des remarques similaires auparavant, tels l'astronome suisse Jean Philippe Loÿs de Cheseaux en 1744 et Johannes Kepler en 1610.

** Pouvez-vous expliquer que le ciel n'est pas noir simplement parce qu'il est peint en noir ou composé de chocolat noir ? Ou, plus généralement, que le ciel n'est pas constitué de et ne contient aucune substance
Défi 313 pe noire et froide, comme Olbers le suggérait lui-même, et comme John Herschel le réfuta en 1848 ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Dans un Univers jeune, nous ne serions donc pas capables d'admirer les étoiles, même si elles existaient.

À partir de la luminosité du ciel nocturne, mesurée comme valant à peu près $3 \cdot 10^{-13}$ fois celle d'une étoile moyenne comme le Soleil, nous pouvons déduire quelque chose d'intéressant : la densité d'étoiles dans l'Univers doit être beaucoup plus petite que dans notre galaxie. La densité des étoiles dans la Galaxie peut être déduite en comptant les étoiles que nous voyons la nuit. Mais la densité moyenne d'étoiles dans la Galaxie conduirait à des valeurs de luminosités nocturnes beaucoup plus élevées si celle-ci était constante partout dans l'Univers. Nous pouvons donc en conclure que la Galaxie est beaucoup *plus petite* que l'Univers simplement en mesurant la luminosité du ciel nocturne et en comptant les étoiles présentes dans le ciel ! Pouvez-vous développer explicitement les calculs ?

Réf. 189
Défi 315 pe

En résumé, le ciel est noir la nuit parce que l'espace-temps et la matière ont un âge important, mais fini. Comme problème annexe, nous pouvons formuler une énigme : y a-t-il également un paradoxe d'Olbers pour la gravitation ?

Défi 316 pe

L'Univers est-il ouvert, fermé ou situé entre les deux ?

> « - L'immensité de l'Univers ne te donne-t-elle pas l'impression d'être tout petit ?
> - Je peux me sentir petit sans l'aide de l'Univers. »
>
> Anonyme

Parfois, l'histoire de l'Univers est résumée en deux mots : *boum ! ...crac.* Mais l'Univers s'effondrera-t-il réellement, ou se dilatera-t-il à jamais ? Ou encore, se trouve-t-il dans une situation limite intermédiaire ? Les paramètres qui décident de son destin sont la densité et la constante cosmologique.

Les principales nouvelles de la dernière décennie de l'astrophysique du vingtième siècle sont les résultats expérimentaux nous permettant de déterminer ces paramètres. Plusieurs méthodes sont utilisées. La première est évidente : déterminer la vitesse et la distance des astres lointains. Pour de grandes distances, c'est difficile, puisque ces étoiles sont très indistinctes. Mais il est devenu possible aujourd'hui de scruter le ciel à la recherche de supernovae, des étoiles brillantes en explosion, et de déterminer leur distance à partir de leur luminosité. Nous y parvenons actuellement grâce à des moyens informatiques d'examen du ciel, en utilisant les plus grands télescopes disponibles.

Réf. 192

Une deuxième méthode consiste à mesurer l'anisotropie du fond cosmologique micro-onde. À partir du spectre de puissance observé comme une fonction de l'angle, la courbure de l'espace-temps peut être retrouvée.

Une troisième méthode est la détermination de la masse volumique de l'Univers, en utilisant l'effet de lentille gravitationnelle pour la lumière issue des quasars lointains, qui est déviée par les galaxies ou les amas de galaxies.

Page 230

Une quatrième méthode est la détermination de la densité en utilisant les amas de galaxies. Nous nous attendons à ce que toutes ces mesures soient grandement améliorées dans les années à venir.

Actuellement, ces quatre ensembles complètement indépendants de mesures fournissent les valeurs

Réf. 193

$$(\Omega_M ; \Omega_\Lambda ; \Omega_K) \approx (0,3 ; 0,7 ; 0,0) \tag{255}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

où les erreurs sont de l'ordre de 0,1 ou moins. Les valeurs impliquent que *l'Univers est spatialement plat, que son expansion s'accélère et, par conséquent, qu'il n'y aura pas de Big Crunch**. Toutefois, aucune déclaration définitive concernant la topologie n'est encore possible. Nous reviendrons sur cette dernière question bientôt.

Page 232

En particulier, les données indiquent que la densité de matière, incluant toute la matière noire, ne représente environ qu'un tiers de la valeur critique**. Les deux autres tiers sont fournis par le terme cosmologique. Pour la constante cosmologique Λ nous obtenons la valeur

$$\Lambda = \Omega_\Lambda \frac{3H_0^2}{c^2} \approx 10^{-52}\,/\mathrm{m}^2 \,. \tag{256}$$

Cette valeur possède des implications majeures pour la théorie quantique, puisqu'elle correspond à une densité d'énergie du vide

$$\rho_\Lambda c^2 = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G} \approx 0{,}5\,\mathrm{nJ/m}^3 \approx \frac{10^{-46}\,(\mathrm{GeV})^4}{(\hbar c)^3} \,. \tag{257}$$

Mais ce terme cosmologique implique également une pression négative du vide $p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2$. En introduisant ce résultat dans la relation du potentiel de la gravitation universelle déduite de la relativité

Page 183

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho + 3p/c^2) \tag{258}$$

Réf. 194

nous obtenons

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho_\mathrm{M} - 2\rho_\Lambda) \,. \tag{259}$$

Défi 317 pe

Donc l'accélération gravitationnelle est

$$a = \frac{GM}{r^2} - \frac{\Lambda}{3}c^2 r = \frac{GM}{r^2} - \Omega_\Lambda H_0^2\, r \,, \tag{260}$$

ce qui indique qu'une énergie du vide *positive* entraîne en réalité l'existence d'un effet gravitationnel *répulsif*. En insérant la valeur mentionnée (256) pour la constante cosmologique Λ, nous trouvons que l'effet répulsif est minuscule même sur des distances telles que celle qui sépare la Terre du Soleil. En fait, l'ordre de grandeur de l'effet répulsif est tellement petit par rapport à celui de l'attraction que nous ne pouvons pas du tout espérer obtenir une confirmation expérimentale directe de cet écart par rapport à la gravitation universelle. Les déterminations astrophysiques demeureront probablement les seules possibles. Une constante gravitationnelle positive se manifeste par le biais d'une composante positive dans le taux d'expansion, comme nous le verrons bientôt.

Défi 318 pe

* Le Big Crunch, c'est-à-dire l'effondrement de l'Univers, serait équivalent à un « Big Bang à l'envers ». [N.D.T.]

** La différence entre la densité totale de matière et la densité de matière baryonique mesurable séparément, environ un sixième seulement de la valeur précédente, n'est également toujours pas expliquée. Il se pourrait même que l'Univers contienne de la matière d'un type inconnu jusqu'à présent. Cette énigme est appelée le *problème de la matière noire*, elle constitue une des questions les plus importantes non résolues en cosmologie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Mais cette situation est déconcertante. L'origine de cette constante cosmologique n'est *pas* expliquée par la relativité générale. Ce mystère sera résolu uniquement à l'aide de la théorie quantique. Dans tous les cas, la constante cosmologique est le premier aspect local et quantique de la nature détecté par des moyens astrophysiques.

Pourquoi l'Univers est-il transparent ?

L'Univers pourrait-il être rempli d'eau, qui est transparente, comme certains ouvrages populaires le soutiennent afin d'expliquer la pluie ? Non. Même s'il était empli d'air, la masse totale n'aurait jamais permis à l'Univers d'atteindre la taille qu'il a aujourd'hui, il se serait effondré beaucoup plus tôt et nous n'existerions pas.

Réf. 195

Défi 319 pe

L'Univers est donc transparent parce qu'il est principalement vide. Mais *pourquoi* est-il si vide ? Tout d'abord, à l'époque où la taille de l'Univers était minuscule, toute l'antimatière s'est annihilée avec la quantité équivalente de matière. Seule une infime fraction de matière, qui était initialement légèrement plus abondante que l'antimatière, est restée. Cette fraction de 10^{-9} est la matière que nous voyons aujourd'hui. Par conséquent, il y a 10^9 fois plus de photons dans l'Univers que d'électrons ou de quarks.

Page ??

De plus, 380 000 ans après l'annihilation de l'antimatière, tous les noyaux et les électrons présents se sont associés, pour former des atomes et leurs agrégats, tels que les étoiles et les hommes. Il ne restait alors plus aucune charge libre interagissant avec des photons dans l'espace, de telle façon que depuis cette période la lumière peut voyager dans l'espace comme elle le fait aujourd'hui, n'étant affectée que lorsqu'elle rencontre une étoile ou des particules de poussière.

Si nous nous rappelons que la densité moyenne de l'Univers est de $10^{-26}\,\mathrm{kg/m^3}$ et que la majeure partie de la matière est agrégée par la gravité en galaxies, nous pouvons imaginer qu'un excellent vide se maintient dans les espaces intergalactiques. Par conséquent, la lumière peut voyager sur de longues distances sans obstacles significatifs.

Mais pourquoi le vide est-il transparent ? C'est une question plus profonde. Le vide est transparent parce qu'il ne contient aucune charge électrique et aucun horizon : les charges ou les horizons sont indispensables pour absorber la lumière. En réalité, la théorie quantique montre que le vide contient ce que nous appelons des charges *virtuelles*. Cependant, les charges virtuelles n'ont aucun effet sur la propagation de la lumière.

Page ??

Le Big Bang et ses répercussions

> « Μελέτη θανάτου. S'entraîner à la mort. »
> Platon, *Phédon*, 81a.

Par-dessus tout, le modèle du Big Bang, qui est énoncé en observant la couleur des astres et des galaxies, établit qu'il y a environ quatorze milliards d'années l'Univers tout entier était extrêmement petit. C'est cette situation qui a donné au Big Bang son nom. Ce terme fut forgé (avec une certaine connotation sarcastique) en 1950 par Fred Hoyle, qui, par ailleurs, n'avait jamais pensé qu'il puisse s'appliquer à la nature. Néanmoins, ce terme fut adopté. Puisque nous ne pouvons pas vérifier directement que l'Univers était si petit par le passé, nous avons besoin de rechercher d'autres conséquences vérifiables. Les plus importantes sont les suivantes :

Page 234

Réf. 196

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

— toute matière s'éloigne du reste de la matière ;
— la masse de l'Univers est constituée d'environ 75 % d'hydrogène et 23 % d'hélium ;
— il existe un rayonnement thermique de fond cosmologique d'environ 2,7 K ;
— l'âge maximal pour n'importe quel système dans l'Univers est d'environ quatorze milliards d'années ;
— il y a un fond cosmologique de neutrinos d'une température d'environ 2 K* ;
— pour une constante cosmologique non nulle, la gravité newtonienne est légèrement plus faible.

Toutes ces prédictions, excepté les deux dernières, ont été confirmées par les observations. La technologie ne nous permettra probablement pas de vérifier celles-ci dans un proche avenir. Toutefois, il n'existe aucune pièce à conviction à leur encontre.

Des descriptions concurrentes de l'Univers ne sont pas parvenues avec autant de
Réf. 196 succès à cette concordance avec les observations. De plus, des arguments théoriques stipulent qu'avec les distributions de matière que nous observons, et quelques hypothèses un peu plus générales, il n'existe aucune manière de contourner l'existence d'une pé-
Réf. 197 riode dans le passé *fini* au cours de laquelle l'Univers était extrêmement petit. Il est donc important de porter un regard attentif sur cette situation.

Le Big Bang fut-il un Big Bang ?

Fut-il une sorte d'explosion ? Cette description implique que de la matière transforme en quelque sorte de l'énergie interne en un mouvement de ses parties. Il n'y a jamais eu un tel processus dans l'histoire du début de l'Univers. En fait, une meilleure description consiste à dire que l'espace-temps est en expansion, plutôt que de dire que la matière se déplace. Le mécanisme et l'origine de l'expansion sont *inconnus* à ce niveau de notre ascension montagneuse. À cause de l'importance de l'expansion spatiale, le phénomène global ne peut aucunement être qualifié d'explosion. Et manifestement il n'y a jamais eu, et il n'y a pas, de milieu pouvant transporter le son dans l'espace interstellaire ; ainsi nous ne pouvons pas parler d'un « bang », quel que soit le sens de ce terme.

Était-il gros (« big ») ? L'Univers visible était plutôt ridiculement petit il y a environ quatorze milliards d'années, beaucoup plus petit qu'un atome. En résumé, le Big Bang n'était ni gros ni un bang, mais le reste est correct.

Le Big Bang fut-il un événement ?

La théorie du Big Bang est une description de ce qui est survenu dans l'espace-temps *tout entier*. Contrairement à ce qu'on lit fréquemment dans les articles de journaux imprudents, à chaque instant de son expansion l'espace avait une taille non nulle : l'espace n'a *jamais* été un simple point. Les individus qui prétendent qu'il le fut font des déclarations plausibles en apparence, mais fausses en réalité. La théorie du Big Bang est une description de l'*expansion* de l'espace-temps, et non de son origine. En suivant le mouvement de la matière en remontant le temps, la relativité générale ne peut pas déduire l'existence d'une singularité initiale. Le problème des erreurs de mesure n'est probablement pas un obstacle. Cependant, l'effet induit par les non-linéarités de la relativité générale dans les situations de densités d'énergie énormes n'est pas encore très clair.

* La théorie établit que $T_\nu / T_\gamma \approx (4/11)^{1/3}$. Ces neutrinos sont apparus à peu près 0,3 s après le Big Bang.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

De façon plus importante, la théorie quantique montre que le Big Bang n'était *pas* une véritable singularité, puisque aucune observable physique, que ce soit la densité ou la température, n'a jamais atteint une valeur infiniment grande (ou infiniment petite). De telles grandeurs ne peuvent pas exister dans la nature*. Dans tous les cas, il existe un consensus général pour dire que les raisonnements fondés uniquement sur la relativité générale *pure* ne peuvent pas faire des déductions correctes concernant le Big Bang. Pourtant, la plupart des déclarations que l'on trouve dans les articles de journaux sont de cet acabit.

Page ??

Le Big Bang fut-il un commencement ?

Se demander ce qu'il y avait avant le Big Bang revient à se demander où se trouve le nord au pôle Nord. De même que rien n'indique le nord au pôle Nord, il n'y « avait » rien avant le Big Bang. Cette analogie pourrait être mal interprétée, au point d'impliquer que le Big Bang a débuté en un point unique précis du temps, ce qui est bien sûr inexact, comme nous venons de l'expliquer. Mais cette analogie est meilleure qu'elle ne paraît : en fait, il n'y a *pas* de pôle Nord précis, puisque la théorie quantique montre qu'il existe une incertitude fondamentale quant à sa position. Il existe de même une incertitude correspondante pour le Big Bang.

En réalité, un raisonnement très simple permet de montrer qu'avec la théorie quantique le temps et l'espace *ne* sont *pas* définis au moment ou à proximité du Big Bang. Nous fournirons ce raisonnement élémentaire dans le premier chapitre de la dernière partie de notre promenade. Par conséquent, le Big Bang ne peut pas être qualifié de « commencement » de l'Univers. Il n'y a jamais eu de temps lorsque le facteur d'échelle $a(t)$ de l'Univers était égal à zéro.

Page ??

Cette erreur conceptuelle est fréquemment rencontrée. En fait, la théorie quantique indique que près du Big Bang les événements ne peuvent *ni* être ordonnés *ni* même être définis. Plus franchement, il n'y a *pas* de commencement, il n'y a jamais eu d'événement ou de singularité initiale.

Certes, le concept de temps n'est pas défini « en dehors » ou « avant » l'existence de l'Univers, ce fait étant déjà évident pour les penseurs il y a plus de mille ans. Il est alors tentant de conclure que le temps doit avoir *commencé*. Mais comme nous l'avons vu, c'est également une erreur logique : en premier lieu, il n'y a pas d'événement de départ, et, deuxièmement, le temps ne s'écoule pas, comme nous l'avions déjà révélé au début de notre promenade.

Réf. 198

Page 38

Une confusion similaire se cache derrière l'idée que l'Univers possède certaines « conditions initiales ». Des conditions initiales *par définition* ont un sens uniquement pour des objets ou des champs, c'est-à-dire pour des entités qui peuvent être observées de l'extérieur, ou encore pour des entités qui possèdent un environnement. L'Univers ne se conformant pas à cette nécessité, il ne peut donc avoir d'états initiaux. Malgré tout, de nombreuses personnes s'évertuent toujours à réfléchir sur ce problème. De manière intéressante, Stephen Hawking a vendu des millions d'exemplaires d'un livre expliquant

Page 163

Réf. 199

* De nombreux physiciens sont toujours prudents avant de faire des déclarations aussi profondes sur ce point. Les premières sections de la troisième partie de notre ascension montagneuse fournissent les arguments précis qui conduisent à celles-ci.

Page ??

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

qu'une description dépourvue d'états initiaux est la plus séduisante, l'emportant largement sur le fait qu'il n'existe de toute façon aucune autre possibilité*.

En résumé, le Big Bang n'est pas un commencement, pas plus qu'il n'en implique un. Nous lèverons le voile sur la manière correcte de méditer sur ce sujet dans la dernière partie de notre progression sur la montagne.

Le Big Bang implique-t-il une création ?

> « [La théorie générale de la relativité procure] un doute universel concernant l'existence de Dieu et de sa création. »
>
> Un chasseur de sorcières.

La création, c'est-à-dire l'apparition de quelque chose à partir de rien, nécessite un
Page 226 concept prédéfini de l'espace et du temps pour avoir une signification. Sinon, ce concept d'« apparition » est vide de sens. Mais, quelle que soit la description du Big Bang, qu'elle soit classique, comme dans ce chapitre, ou quantomécanique, comme dans les prochains, cette condition n'est jamais remplie. Même dans la description classique actuelle du Big Bang, qui fut à l'origine de sa dénomination, il n'y a *pas* d'apparition de matière, ni d'énergie, ni de quoi que ce soit d'autre. Et cette situation ne changera pas, quelle que soit la description ultérieure améliorée, puisque le temps ou l'espace ne sont jamais définis *avant* l'apparition de la matière.

En fait, toutes les propriétés d'une création sont absentes : il n'existe aucun « instant » de création, aucune apparition à partir de rien, aucun choix possible de quelconques conditions « initiales » piochées dans un certain ensemble de possibilités et, comme nous le verrons plus en détail plus loin, pas même un quelconque choix de « lois » physiques particulières à partir d'un quelconque ensemble d'éventualités.

En résumé, le Big Bang n'implique ni ne nourrit aucun processus de création. Il n'était pas un événement, pas un commencement et *pas non plus* une situation de création. Il est impossible de poursuivre l'ascension de la Montagne Mouvement si nous ne pouvons
Défi 320 pe pas accepter chacune de ces trois conclusions. Les renier revient à persévérer dans le domaine des croyances et des préjugés, donc à renoncer définitivement à progresser dans notre aventure.

Remarquez que cette exigence n'est pas nouvelle. En fait, elle était déjà contenue implicitement dans l'équation (1) au tout début de notre excursion, de même que dans toutes
Page 41 les suivantes. Elle apparaît de manière encore plus flagrante à ce niveau. Mais finalement *qu'est-ce* que le Big Bang ? Nous le découvrirons dans l'ultime partie de notre ascension. Nous revenons maintenant sur la discussion concernant ce que les étoiles peuvent nous enseigner sur la nature.

Pourquoi pouvons-nous voir le Soleil ?

En premier lieu, le Soleil peut être observé parce que l'air est transparent. Il n'est pas évident en soi que l'air soit transparent ; en fait, il ne l'est que pour la lumière *visible* et pour quelques autres fréquences données. Les rayonnements infrarouge et ultravio-

* Cette phrase suscitera toujours des réactions fortes de la part des physiciens, elle sera analysée plus en détail dans la section sur la théorie quantique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

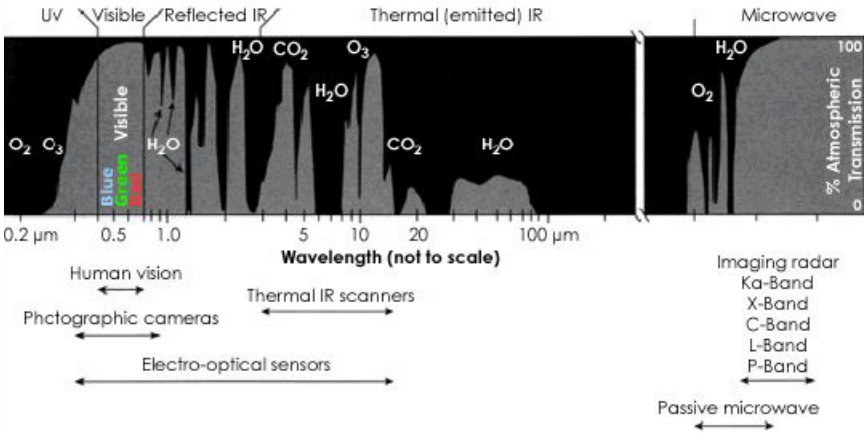


FIGURE 86 Transmittance de l'atmosphère. (NASA)

let sont majoritairement absorbés. Les explications résident dans le comportement des molécules qui composent l'air, à savoir principalement l'azote, l'oxygène et quelques autres gaz transparents. Plusieurs satellites et planètes du Système solaire possèdent des atmosphères opaques : nous avons en fait beaucoup de chance de pouvoir contempler les étoiles.

En réalité, l'air lui-même n'est pas parfaitement transparent, ses molécules *diffusent* très légèrement la lumière. Cela explique pourquoi le ciel et les montagnes lointaines paraissent bleus et le coucher du soleil paraît rouge*, et pourquoi les étoiles sont invisibles en cours de journée. L'atmosphère est même opaque à de nombreuses longueurs d'onde éloignées du spectre visible, comme l'indique la Figure 86. (Elle est également opaque pour toutes les longueurs d'onde inférieures à 200 nm, jusqu'aux rayons gamma. Sur la grande étendue du spectre électromagnétique, elle reste transparente jusqu'à une longueur d'onde d'environ 10 à 20 m, en fonction de l'activité solaire, où l'opacification due à l'ionosphère se met en place.)

En second lieu, nous pouvons voir le Soleil parce que celui-ci, comme tous les corps chauds, *émet* de la lumière. Nous allons par la suite décrire en détail l'*incandescence*, puisque c'est comme cela que cet effet est dénommé.

Page 145

Troisièmement, nous pouvons voir la lumière du jour parce que nous sommes, comme notre environnement et le voisinage du Soleil, *plus froids* que le Soleil lui-même. En réalité, les corps incandescents peuvent être discernés de leur arrière-plan uniquement si celui-ci est plus froid. C'est une conséquence des propriétés de l'émission incandescente de lumière, généralement appelée *rayonnement de corps noir*. Ce rayonnement est indépendant de la matière, de telle sorte que, pour un milieu ayant la même température que le corps, nous ne pouvons absolument rien discerner de particulier. Pour preuve, jetez simplement un œil sur la photographie de la page 121.

Enfin, nous pouvons voir le Soleil parce qu'il n'est pas un trou noir. S'il l'était, il n'émettrait (pratiquement) pas de lumière.

* La diffusion de l'air fait que le ciel est également bleu la nuit, comme nous pouvons le démontrer par des photos à longue pose. (Consultez, par exemple, la Figure 67.) Néanmoins, nos yeux ne sont pas capables de le percevoir, et les faibles intensités de lumière font qu'il nous apparaît comme noir.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Manifestement, chacune de ces conditions s'applique également aux étoiles en général. Par exemple, nous pouvons les contempler uniquement parce que le ciel nocturne est noir. Mais alors, comment expliquer la présence dans le ciel de multiples couleurs ?

POURQUOI LES COULEURS DES ÉTOILES SONT-ELLES DIFFÉRENTES ?

Les étoiles sont visibles parce qu'elles émettent de la lumière visible. Nous avons rencontré plusieurs effets importants qui déterminent les couleurs : les températures variées des étoiles, le décalage Doppler dû à une vitesse relative par rapport à l'observateur et le décalage vers le rouge gravitationnel.

Toutes les étoiles ne constituent pas de bonnes approximations de corps noirs, de telle manière que la loi du rayonnement du corps noir ne décrit pas toujours fidèlement leur couleur. Toutefois, la plupart des étoiles sont des approximations raisonnables de corps noirs. La température d'une étoile dépend principalement de sa taille, de sa masse, de sa composition et de son âge, comme les astrophysiciens aiment l'expliquer. Orion représente un excellent exemple de constellation colorée : toutes ses étoiles possèdent une couleur différente. Les photos à longue pose le montrent de façon merveilleuse.

Page 119
Réf. 200
Page 65

La couleur fondamentale déterminée par la température est modifiée par deux effets. Le premier, le *décalage Doppler vers le rouge* z, dépend de la vitesse v relative entre la source et l'observateur, comme suit

Défi 321 pe

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_O} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1\,. \tag{261}$$

De tels décalages jouent un rôle significatif uniquement pour des étoiles visibles éloignées, et donc pâles, observées au moyen de télescopes. À l'œil nu, les décalages Doppler ne peuvent être perçus. Mais ceux-ci peuvent faire en sorte que des astres lointains brillent dans l'infrarouge au lieu du domaine spectral visible. En fait, les plus forts décalages Doppler observés pour des objets lumineux sont supérieurs à 5,0, correspondant à une vitesse de récession de plus de 94 % de la vitesse de la lumière. Remarquez que dans l'Univers le décalage vers le rouge est également relié au facteur d'échelle $R(t)$ par

Défi 322 pe

$$z = \frac{R(t_0)}{R(t_{\text{émission}})} - 1\,. \tag{262}$$

La lumière émise avec un décalage spectral de 5,0 l'a donc été lorsque l'Univers avait un sixième de son âge actuel.

L'autre effet qui modifie la couleur, le *décalage vers le rouge gravitationnel* z_g, dépend de la densité de matière de la source et est donné par

$$z_g = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_0} - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}} - 1\,. \tag{263}$$

Il est généralement beaucoup plus petit que le décalage Doppler. Pouvez-vous le confirmer ?

Défi 323 pe

Nous ne connaissons aucun autre processus de décalage vers le rouge. De surcroît, de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 6 La couleur des étoiles.

Classe	Température	Exemple	Localisation	Couleur
O	30 kK	Mintaka	δ Orionis	bleu-violet
O	31(10) kK	Alnitak	ζ Orionis	bleu-violet
B	22(6) kK	Bellatrix	γ Orionis	bleu
B	26 kK	Saiph	κ Orionis	bleu-blanc
B	12 kK	Rigel	β Orionis	bleu-blanc
B	25 kK	Alnilam	ε Orionis	bleu-blanc
B	17(5) kK	Régulus	α Leonis	bleu-blanc
A	9,9 kK	Sirius	α Canis Majoris	bleu-blanc
A	8,6 kK	Megrez	δ Ursae Majoris	blanc
A	7,6(2) kK	Altaïr	α Aquilae	jaune-blanc
F	7,4(7) kK	Canopus	α Carinae	jaune-blanc
F	6,6 kK	Procyon	α Canis Minoris	jaune-blanc
G	5,8 kK	Soleil	écliptique	jaune
K	3,5(4) kK	Aldébaran	α Tauri	orange
M	2,8(5) kK	Bételgeuse	α Orionis	rouge
D	< 80 kK	–	–	quelconque

Remarques : les naines blanches, ou étoiles de classe D, sont des résidus d'étoiles ayant explosé, avec une taille de seulement quelques dizaines de kilomètres. Elles ne sont pas toutes blanches, elles peuvent être jaunes ou rouges. Elles représentent 5 % de toutes les étoiles. Aucune n'est visible à l'œil nu. Les incertitudes dans les derniers chiffres de la température sont indiquées entre parenthèses.
La taille de toutes les autres étoiles est une variable indépendante et est parfois accolée en chiffres romains à la fin du type spectral. (Sirius est une étoile A1V, Arcturus une étoile K2III.) Des géantes et supergéantes existent dans toutes les classes allant de O à M.
Pour accueillir les naines brunes, deux nouvelles classes stellaires, L et T, ont été proposées.

Page 240

tels processus contrediraient toutes les propriétés connues de la nature. Mais le problème de la couleur nous conduit à la question qui suit.

Existe-t-il des étoiles sombres ?

Il se pourrait que certaines étoiles ne soient pas aperçues parce qu'elles sont sombres. On pourrait ainsi expliquer la présence de l'énorme quantité de matière noire relevée dans les mesures récentes du rayonnement de fond diffus. Cette énigme est d'un intérêt majeur et est actuellement âprement débattue. Nous savons que des objets plus massifs que Jupiter mais moins massifs que le Soleil peuvent exister à des stades pour lesquels ils émettent une quantité à peine perceptible de lumière. Nous les appelons des *naines brunes*. Nous ne savons pas encore très bien actuellement combien d'objets de cette catégorie peuvent exister. Un grand nombre de « planètes » extrasolaires sont probablement des naines brunes. Ce problème n'a pas encore trouvé de solution.

Une autre éventualité pour l'existence d'astres ténébreux est représentée par les trous

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

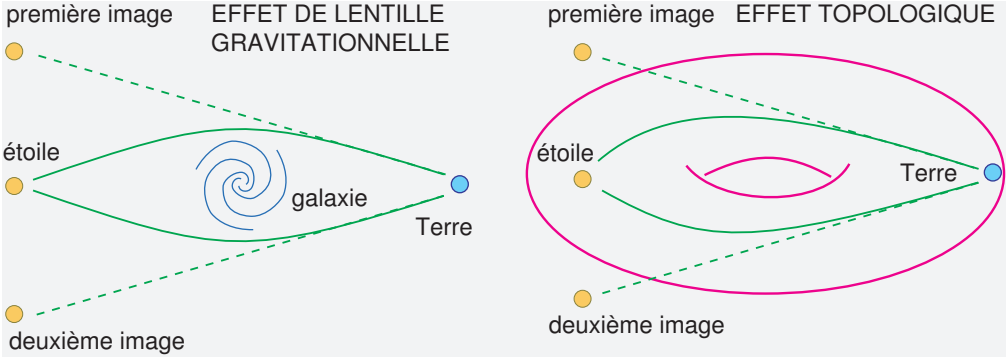


FIGURE 87 Comment une étoile peut conduire à la formation de plusieurs images.

Page 241 noirs. Ceux-ci sont analysés plus en détail ci-dessous.

TOUTES LES ÉTOILES SONT-ELLES DIFFÉRENTES ? – LENTILLES GRAVITATIONNELLES

« Per aspera ad astra*. »

Sommes-nous certains que la nuit deux étoiles sont réellement distinctes ? La réponse est non. On a montré récemment que deux « étoiles » étaient en réalité deux images du même objet. Cela fut relevé en comparant le vacillement lumineux des deux images. On a découvert que l'oscillation d'une des images était exactement identique à l'autre, décalée simplement de 423 jours. Ce résultat fut découvert par l'astrophysicien estonien Jaan Pelt et son groupe de recherche, pendant l'observation de deux images de quasars dans le système Q0957+561. Réf. 201

Ces deux images sont la conséquence de l'*effet de lentille gravitationnelle*, comme indiqué sur la Figure 87. En réalité, une énorme galaxie, beaucoup plus proche de la Terre, peut être aperçue entre les deux images. Cet effet avait déjà attiré l'attention d'Einstein, mais il ne pensait pas qu'il était observable. Le père légitime de l'effet de lentille gravitationnelle est Fritz Zwicky, qui prédit en 1937 que cet effet serait plutôt répandu et facile à observer si l'on s'intéressait à des galaxies situées sur la ligne de visée plutôt qu'à des d'étoiles. Et effectivement, cela s'est révélé être le cas. Réf. 202

De façon intéressante, lorsque le temps de propagation est connu, les astronomes sont capables de déterminer la taille de l'Univers à partir de cette observation. Pouvez-vous imaginer comment ? Défi 324 pe

En fait, si les deux objets observés sont alignés exactement l'un derrière l'autre, celui qui est le plus éloigné est vu sous la forme d'un *anneau* entourant le plus proche. De tels anneaux ont effectivement été observés, et l'image de la galaxie autour d'une galaxie centrale située en avant-plan à l'emplacement de B1938+666, indiquée sur la Figure 88, en représente l'un des exemples les plus magnifiques. En 2005, plusieurs cas de lentilles gravitationnelles engendrées par des étoiles ont également été signalés. Trois exemples

* « Des sentiers ardus jusqu'aux étoiles. » Une célèbre locution latine. Fréquemment citée de manière incorrecte par « per ardua at astra ».

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

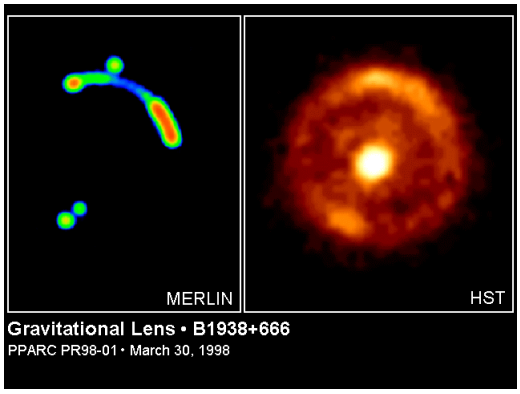


FIGURE 88 L'anneau de Zwicky–Einstein B1938+666, vu dans le spectre radio (à gauche) et dans le domaine optique (à droite). (NASA)

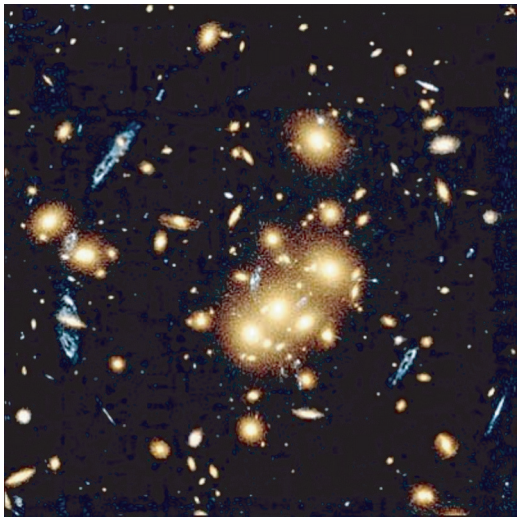


FIGURE 89 Images bleues multiples d'une galaxie formées par l'amas en jaune CL0024+1654. (NASA)

encore plus intéressants, où l'une des deux étoiles possède une planète de masse comparable à la Terre, ont également été observés. Les années à venir conduiront certainement à de nombreuses observations complémentaires, à l'aide notamment du programme d'observation céleste de l'hémisphère Sud qui analyse la luminosité d'environ 100 millions d'étoiles chaque nuit.

En règle générale, les images d'étoiles proches de nous sont véritablement uniques, mais pour les étoiles distantes, ce problème est plus épineux. Globalement, pour des étoiles seules, cette répercussion n'est pas très conséquente. De manière rassurante, seules quelque 80 images multiples d'étoiles ont été identifiées jusqu'à présent. Mais lorsque des galaxies entières sont observées en même temps sous forme de plusieurs images distinctes (et pour le moment on en a décelé plusieurs douzaines), nous pourrions commencer à nous sentir déconcertés. Dans la situation de l'amas de galaxies CL0024+1654, indiqué sur la Figure 89, on aperçoit sept images bleues, minces et allongées de la même galaxie lointaine, autour des galaxies elliptiques jaunes plus proches de nous.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Si des images multiples peuvent être engendrées par des lentilles gravitationnelles, la *forme* de l'Univers pourrait également y ajouter son petit grain de sel.

Quelle est la forme de l'Univers ?

Il existe une analogie répandue qui permet d'échapper à certains des problèmes que nous venons de soulever. L'Univers dans son évolution est similaire à la surface d'une sphère en expansion permanente : la surface est finie, mais elle ne possède pas de frontières. L'Univers est tout simplement doté d'une dimension supplémentaire ; par conséquent, son volume est également en accroissement perpétuel et fini, mais sans frontières. Cette affirmation présume que l'Univers possède la même topologie, la même « forme » que celle d'une sphère ayant une dimension supplémentaire.

Mais quelle preuve expérimentale permet-elle d'appuyer cette affirmation ? Il n'y en a aucune. Nous ne savons encore rien sur la morphologie de l'univers. Elle est extrêmement ardue à déterminer, simplement à cause de sa taille vertigineuse.

Réf. 203

Qu'est-ce que les expériences nous enseignent ? Dans l'Univers local, disons à l'intérieur d'une région de quelques millions d'années-lumière qui nous entoure, la topologie est simplement connexe. Mais pour des distances plus grandes, nous ne pouvons pratiquement rien affirmer. Les recherches sur les sursauts gamma nous informeront peut-être sur la topologie, puisque ces sursauts se sont produits pour la plupart à l'aube des temps*. Peut-être même l'étude des fluctuations du rayonnement de fond diffus cosmologique nous en dira-t-elle plus. Toutes ces recherches en sont encore à leurs balbutiements.

Puisque nous en savons peu, nous pouvons nous interroger sur l'ensemble des réponses possibles. Comme mentionné ci-dessus, dans le modèle standard de la cosmologie avec $k = 1$, l'espace-temps est généralement considéré comme étant un produit entre un temps linéaire, ayant la topologie $\mathbb{R}$ de la droite réelle, et une sphère S^3 pour l'espace. Cela constitue la forme la plus élémentaire possible, correspondant à un Univers *simplement connexe*. Pour $k = 0$, la topologie la plus simple pour l'espace est l'espace réel tridimensionnel $\mathbb{R}^3$, et pour $k = -1$ c'est une variété hyperbolique $\mathbf{H}^3$.

Page 216

De surcroît, la Figure 82 avait montré que, en fonction de la valeur de la constante cosmologique, l'espace pouvait être fini et délimité, ou infini et sans bords. Selon les calculs de Friedmann–Lemaître, la simple connexité est ordinairement implicitement présumée, bien qu'elle ne soit pas du tout requise.

Il se pourrait bien que l'espace-temps soit *multiplement* connexe, comme une version d'un tore de dimension supérieure. Il pourrait également y avoir des topologies encore plus complexes**. Dans ces circonstances, il se pourrait même que le véritable nombre de galaxies soit beaucoup plus petit que celui que l'on observe. Cette situation correspondrait à un kaléidoscope, où quelques perles produisent un grand nombre d'images par réflexion. De plus, des surprises topologiques pourraient aussi être camouflées *derrière* l'horizon.

En réalité, l'étendue des possibilités n'est pas limitée aux cas de connexité simple et

* Cette histoire est contée du point de vue mathématique par Bob Osserman, *Poetry of the Universe*, 1996.

** La métrique de Friedmann–Lemaître est également valable pour n'importe quel quotient des topologies simples mentionnées ci-dessus par un groupe d'isométries, engendrant des espaces diédraux et des espaces lenticulaires dans le cas où $k = 1$, des tores dans le cas où $k = 0$, et *n'importe quelle* variété hyperbolique dans le cas où $k = -1$.

Réf. 204

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

multiple suggérés par la physique classique. Un écueil supplémentaire et complètement inattendu surgira dans la dernière partie de notre promenade, quand la théorie quantique
Page ?? sera intégrée à nos investigations.

Qu'y a-t-il derrière l'horizon ?

> « L'Univers est un lieu gigantesque, peut-être le plus grand. »
>
> Kilgore Trout, *Venus on the Half Shell*.

L'horizon est une entité compliquée. En fait, tous les modèles cosmologiques
Réf. 205 montrent qu'il s'éloigne hâtivement de nous. Un examen minutieux révèle que pour un
Défi 325 pe Univers dominé par la matière l'horizon s'éloigne de nous à une vitesse

$$v_{\text{horizon}} = 3c \ . \tag{264}$$

C'est un merveilleux résultat, n'est-ce pas ? Évidemment, puisque l'horizon ne transporte aucun signal, ce n'est pas en contradiction avec la relativité. Mais qu'y a-t-il derrière l'horizon ?

Si l'Univers est *ouvert* ou *marginal* (juste à la limite), la matière que nous voyons la nuit est identifiée par la relativité générale, appliquée de manière directe, comme représentant une portion – littéralement – infiniment petite de toute la matière qui existe. En fait, un Univers ouvert ou marginal implique qu'il y a une quantité infinie de matière
Défi 326 pe derrière l'horizon. Une telle affirmation est-elle réfutable ?

Dans un Univers *fermé*, on conjecture toujours que de la matière se trouve derrière l'horizon, mais dans ce cas cela n'en concerne qu'une quantité finie.

En bref, le modèle standard de la cosmologie établit qu'il y a une grande quantité de matière située derrière l'horizon. Comme la majorité des cosmologistes, nous mettons ce problème de côté pour l'instant et nous le ressortirons plus tard au cours de notre promenade. Une description précise de ce sujet est apportée par l'hypothèse de l'inflation.

Pourquoi y a-t-il des étoiles dans tous les recoins du ciel ? – L'inflation

Que furent les conditions initiales de la matière ? La matière était distribuée selon une densité constante dans l'espace se dilatant à grande vitesse. Comment cela a-t-il pu se produire ? La personne qui a exploré cette question de la manière la plus approfondie est Alan Guth. Jusque-là, nous avons fondé nos études du ciel nocturne, de la cosmologie, sur deux principes observationnels : l'isotropie et l'homogénéité de l'Univers. De plus, l'Univers est (presque) plat. L'inflation représente une percée pour tenter de comprendre l'origine de ces observations. L'uniformité observée en ce moment est étrange : l'aspect plat est une solution instable des équations de Friedmann. Puisque l'Univers est toujours plat après quatorze milliards d'années, il devait être encore plus plat près du Big Bang.

Réf. 206 Guth argumenta que cette homogénéité, cette isotropie et cette platitude pouvaient précisément apparaître si, au cours de la première seconde de son histoire, l'Univers avait traversé une brève phase d'accroissement exponentiel de sa taille, qu'il appela *inflation*. Cette augmentation exponentielle de taille, d'un facteur d'environ 10^{26}, aurait homogénéisé l'Univers. Cette évolution extrêmement courte aurait été pilotée par un champ

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

encore inconnu, le *champ de l'inflation*. L'inflation semble également décrire correctement la croissance des inhomogénéités présentes dans le rayonnement de fond diffus cosmologique.

Mais voilà, jusqu'à présent, l'inflation pose autant de questions qu'elle n'en résout. Vingt ans après sa soumission initiale, Guth reste lui-même sceptique sur le fait de savoir si elle constitue une véritable avancée conceptuelle. Le dernier mot de l'histoire n'a pas encore été prononcé.

Pourquoi y a-t-il si peu d'étoiles ? – Le contenu en énergie et en entropie de l'Univers

> « Die Energie der Welt ist constant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu*. »
>
> Rudolph Clausius

La densité de matière–énergie de l'Univers est proche de la valeur critique. L'inflation, décrite dans la section précédente, constitue l'explication privilégiée pour comprendre cette correspondance. Cela entraîne que le nombre réel d'étoiles est déterminé par le comportement de la matière aux températures extrêmement élevées, et par la densité d'énergie émise à plus basse température. Le rapport précis est toujours un sujet de recherches intenses. Mais ce problème soulève également une question en rapport avec la citation ci-dessus. L'initiateur du mot « entropie », Rudolph Clausius, avait-il raison lorsqu'il formula cette célèbre déclaration ? Portons notre regard sur ce que la relativité générale dit concernant tout cela.

En relativité générale, une énergie *totale* peut effectivement être définie, contrairement à l'énergie *localisée*, qui ne le peut pas. L'énergie totale de toute la matière et du rayonnement est en réalité une constante du mouvement. Elle est donnée par la somme des contributions baryonique, lumineuse et celle relative aux neutrinos :

$$E = E_{\mathrm{b}} + E_{\gamma} + E_{\nu} \approx \frac{c^2 M_0}{T_0} + \ldots + \ldots \approx \frac{c^2}{G} + \ldots \,. \tag{265}$$

Cette valeur est constante uniquement lorsqu'elle est intégrée sur l'Univers tout entier, et non quand on prend seulement en considération l'intérieur de l'horizon**.

De nombreuses personnes y ajoutent aussi un terme d'énergie gravitationnelle. Si nous essayons d'en faire autant, nous sommes obligés de le définir de telle manière qu'il soit exactement égal à la valeur négative du terme précédent. Cette valeur pour l'énergie gravitationnelle conduit à la conjecture populaire qui stipule que l'énergie *totale* de l'Univers doit être nulle. Autrement dit, le nombre d'étoiles pourrait également être limité par cette relation.

Cependant, la discussion sur l'*entropie* laisse entrevoir une question subtile derrière toutes ces formulations apparemment évidentes. Beaucoup de gens ont tenté d'attribuer des valeurs à l'entropie de l'Univers. Certains ont vérifié si la relation

Réf. 207

* « L'énergie de l'Univers est constante. Son entropie tend vers un maximum. »

** Excepté pour le cas où la pression peut être négligée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

$$S = \frac{kc^3}{G\hbar}\frac{A}{4} = \frac{kG}{\hbar c}4\pi M^2 \,, \tag{266}$$

Défi 327 pe qui est correcte pour les trous noirs, s'applique également à l'Univers. Cela présuppose que toute la matière et tout le rayonnement de l'Univers peuvent être décrits par une certaine température moyenne. Ils avancent l'idée que l'entropie de l'Univers est étonnamment faible, de telle façon qu'il doit y avoir un certain principe d'arrangement, dissimulé derrière elle. D'autres spéculent même sur le fait de savoir d'où provient l'entropie de l'Univers, et si l'horizon est la source de celle-ci.

Mais soyons prudents. Clausius postule, sans l'ombre d'un doute, que l'Univers est un système fermé, et en déduit donc l'affirmation citée ci-dessus. Vérifions cette supposition. L'entropie décrit l'énergie maximale qui peut être extraite d'un objet chaud. Suite à la découverte de la structure particulaire de la matière, il devint clair que l'entropie est également déterminée par le nombre d'états microscopiques qui peuvent composer un état macroscopique particulier. Mais ni l'une ni l'autre de ces définitions n'est logique si elle est appliquée à l'Univers dans son ensemble. Il n'existe aucune manière d'extraire de l'énergie de celui-ci, et aucune manière de dire combien d'états microscopiques de l'Univers ressembleraient à son état macroscopique.

L'explication fondamentale est l'impossibilité d'appliquer le concept d'*état* à l'Univers. Page 25 Nous avons tout d'abord défini l'état comme étant toutes ces propriétés d'un système qui nous permettent de le distinguer des autres systèmes ayant les mêmes propriétés intrinsèques, ou qui diffèrent d'un observateur à un autre. Vous devriez pouvoir vérifier, pour votre culture personnelle, que pour l'Univers de telles propriétés qui déterminent Défi 328 s un état n'existent nullement.

Nous pouvons parler de l'état de l'espace-temps, et nous pouvons définir l'état de la matière et de l'énergie. Mais nous ne pouvons pas évoquer l'état de l'Univers, parce que ce concept ne possède aucun sens. S'il n'y a pas d'état pour l'Univers, il n'y a pas d'entropie qui lui soit associée. Et il n'y a pas non plus de valeur pour l'énergie. C'est en fait l'unique conclusion correcte que nous puissions tirer concernant cette question.

Pourquoi la matière est-elle amassée en grumeaux ?

Nous pouvons contempler les étoiles parce que l'Univers est constitué principalement d'espace vide, autrement dit, parce que les étoiles sont petites et distantes. Mais pourquoi est-ce ainsi ? L'expansion cosmique fut déduite et évaluée en utilisant une distribution homogène de la masse. Alors pourquoi la matière s'est-elle agglomérée ?

Il se révèle que des distributions homogènes de masse sont *instables*. Si la densité fluctue pour une raison quelconque, des régions de densité plus élevée attireront plus de matière que les régions de densité moindre. La gravitation entraîne donc que les régions de plus forte densité voient leur densité augmenter, et que les régions de plus faible densité se vident petit à petit de leur contenu. Pouvez-vous confirmer cette instabilité, simple-Défi 329 pe ment en considérant un espace empli de poussière et la formule $a = GM/r^2$? En résumé, même une minuscule fluctuation quantique de la densité engendrera, après un certain laps de temps, des grumeaux de matière.

Mais comment les premières inhomogénéités se sont-elles formées ? C'est l'un des grands problèmes de la physique moderne et de l'astrophysique, pour lequel il n'y a

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pas encore de réponse unanimement acceptée. Plusieurs expériences avancées sont en train de mesurer les variations du spectre de rayonnement du fond diffus cosmologique par rapport à la position angulaire et à la polarisation. Ces résultats, qui seront disponibles dans les années à venir, pourraient fournir des renseignements sur la manière de résoudre ce problème.

Réf. 208

Pourquoi les étoiles sont-elles si petites par rapport à l'Univers ?

Étant donné que la densité de matière est proche de la valeur critique, la taille des étoiles, qui contiennent la plus grande partie de la matière, est une conséquence de l'interaction entre les particules élémentaires qui les constituent. Nous montrerons plus loin que la relativité générale (seule) ne peut pas expliquer une taille quelconque observée dans la nature. La discussion de ce problème constitue un thème de la théorie quantique.

Page 260

Les étoiles et les galaxies sont-elles en train de s'éloigner les unes des autres ou est-ce l'Univers qui se dilate ?

Pouvons-nous faire une distinction entre l'expansion de l'espace et l'éloignement des galaxies ? Oui, nous le pouvons. Pouvez-vous découvrir un argument ou imaginer une expérience permettant de faire cette distinction ?

Défi 330 pe

L'expansion de l'Univers ne s'applique pas à l'espace situé sur Terre. Cette expansion est calculée pour une distribution homogène et isotrope de la masse. La matière n'est ni homogène ni isotrope au sein des galaxies, l'approximation du principe cosmologique n'est donc pas valable ici-bas. On a même vérifié expérimentalement, par l'étude des spectres atomiques provenant de divers endroits du Système solaire, qu'il *n'y a pas* de récession de Hubble dans notre voisinage immédiat.

Réf. 209

Y a-t-il plus d'un Univers ?

L'existence de « plusieurs » Univers pourrait constituer une alternative lorsque nous étudions la question de savoir si nous observons toutes les étoiles. Mais vous pouvez vérifier qu'aucune définition de l'« Univers » donnée ci-dessus, qu'elle soit « toute la matière–énergie » ou « toute la matière–énergie et tout l'espace-temps », ne nous permet de répondre positivement à cette question.

Défi 331 pe

Il n'existe aucun procédé pour définir une pluralité concernant l'Univers : soit l'Univers est le tout, et il est alors unique, soit il n'est pas le tout, et alors il n'est pas l'Univers. Nous découvrirons que la théorie quantique ne fera pas varier cette conclusion, malgré les rumeurs incessantes qui affirment le contraire.

Page ??

Quiconque épilogue sur des Univers multiples tient un discours inintelligible.

Pourquoi les étoiles sont-elles figées ? – Bras, étoiles et principe de Mach

> « Si les astres étaient immobiles, le temps et l'espace n'existeraient plus. »
>
> Maurice Maeterlinck*

* Maurice Maeterlinck (1862–1949) est un célèbre dramaturge belge.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les deux bras que possèdent les hommes ont joué un rôle crucial dans les discussions sur le mouvement, et particulièrement dans le développement de la relativité. En observant le firmament la nuit, nous pouvons formuler une observation élémentaire, si nous relâchons nos bras. Lorsque nous sommes immobiles, nos bras restent le long du corps. Ensuite, nous tournons rapidement sur nous-mêmes. Nos bras se soulèvent. En fait, ils le font à chaque fois que nous voyons les étoiles tourner. Certaines personnes ont passé une grande partie de leur vie à étudier ce phénomène. Pourquoi ?

Réf. 210 Les étoiles et les bras démontrent que le mouvement est relatif, et non pas absolu*. Cette remarque inspire deux formulations possibles de ce qu'Einstein dénommait le *principe de Mach*.

— *Les référentiels inertiels sont déterminés par le reste de la matière contenue dans l'Univers.*

Cette idée est en vérité comprise dans la relativité générale. Il n'y a aucune interrogation à ce sujet.

— *L'inertie est due à l'*interaction *avec le reste de l'Univers.*

Cette variante est plus controversée. Nombreux sont ceux qui l'interprètent comme voulant indiquer que la *masse* d'un objet dépend de la distribution de masse présente dans le reste de l'Univers. Cela signifierait que nous avons besoin d'examiner si la masse est anisotrope lorsqu'un énorme corps est situé à proximité. Bien évidemment, cette question a été étudiée expérimentalement : nous avons simplement besoin d'évaluer si une particule possède la même valeur de masse lorsqu'elle est accélérée dans différentes directions. Il n'est pas surprenant qu'aucune anisotropie de ce type n'ait été décelée jusqu'à
Réf. 211 un très haut niveau de précision. Par conséquent, beaucoup en ont conclu que le principe de Mach est faux, alors que d'autres en ont conclu, non sans difficulté, que ce sujet n'est
Réf. 212 pas encore définitivement tranché.

Mais en réalité, il est aisé de voir que Mach *ne pouvait pas* sous-entendre une variation de masse : nous devrions alors également conclure que la masse est dépendante de la distance, même en physique galiléenne. Mais nous savons que ce n'est pas vrai, personne
Défi 332 pe en son for intérieur n'a eu un quelconque doute là-dessus.

Toute cette discussion est due à un malentendu sur ce que nous entendons par « inertie » : nous pouvons l'interpréter comme étant une *masse* inertielle ou comme étant un *mouvement* inertiel (comme les bras en mouvement sous les étoiles). Il n'existe aucune preuve flagrante indiquant que Mach croyait soit à la masse anisotrope, soit à la masse dépendante de la distance. Toute cette discussion constitue un exemple d'individus annonçant fièrement ne pas faire une erreur, qui est abusivement attribuée à une autre personne présumée plus sotte**.

* Le raisonnement original de Newton, et de nombreuses autres personnalités, faisait appel à un seau et à la surface de l'eau à l'intérieur, mais les arguments sont les mêmes.

** Pour citer un autre exemple, nous avons généralement appris à l'école que Christophe Colomb fut tourné en dérision parce qu'il pensait que la Terre était ronde. Mais il ne fut pas du tout moqué pour cette raison. Il y avait simplement des désaccords sur la *taille* de la Terre, et en fait il s'avéra que ses critiques avaient raison, et qu'il s'était trompé dans son estimation, beaucoup trop petite, du rayon terrestre.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Manifestement, les effets de l'inertie doivent dépendre de la distribution de masse présente dans le reste de l'Univers. Le principe de Mach est correct. Si Mach a commis certaines bévues dans sa vie (notamment son opposition à l'idée des atomes qu'il soutint, malgré l'évidence expérimentale, jusqu'à sa mort), son principe n'en est *pas* une. Malheureusement, il faut s'attendre à ce que ce mythe concernant l'inexactitude du principe
Réf. 212 de Mach persiste, tout comme celui de la dérision concernant Christophe Colomb.

En fait, le principe de Mach possède une importance inestimable. Par exemple, considérez notre galaxie. Les expériences montrent qu'elle est aplatie et en rotation. Le Soleil tourne autour de son centre en 250 millions d'années environ. En réalité, si le Soleil ne tournait pas autour du centre galactique, ce dernier nous engloutirait en à peine 20 millions d'années. Comme le fit remarquer le physicien Dennis Sciama, à partir de la forme de notre galaxie nous pouvons esquisser une conclusion profonde : il doit y avoir une quantité considérable de matière autre que celle que nous voyons, c'est-à-dire un nombre gigantesque d'autres étoiles et galaxies dans l'Univers. Pouvez-vous appuyer son raison-
Défi 333 s nement ?

Au repos dans l'Univers

Il n'existe aucun référentiel de prédilection en relativité restreinte, aucun espace absolu. En est-il de même dans l'Univers réel ? Non, il *existe* un référentiel privilégié. En fait, dans la cosmologie standard du Big Bang, la galaxie moyenne est au repos. Bien que nous parlions du Big Bang, n'importe quelle galaxie moyenne peut proclamer à juste titre qu'elle est au repos. Chacune d'entre elles est en chute libre. La meilleure concrétisation de ce référentiel privilégié est fournie par le rayonnement du fond diffus.

Autrement dit, le ciel nocturne est noir parce que nous nous déplaçons avec une vitesse pratiquement nulle à travers le rayonnement de fond diffus. Si la Terre avait une vitesse relative conséquente par rapport à ce milieu, le ciel paraîtrait brillant même la nuit grâce à l'effet Doppler agissant sur ce fond diffus. En d'autres termes, le fait que le ciel nocturne soit sombre dans toutes les directions est une conséquence de notre lente progression par rapport au rayonnement de fond diffus.

Ce mouvement « lent » possède une vitesse de 368 km/s. (C'est la valeur attribuée au mouvement du Soleil, mais il y a des variantes dues à l'ajout du mouvement de la Terre.) Cette valeur est énorme par rapport à celles de notre vie quotidienne, mais ridicule comparée à la vitesse de la lumière. Des études plus approfondies ne contredisent pas cette conclusion. Même le mouvement de la Voie lactée et celui du Groupe local par rapport au rayonnement de fond diffus cosmologique sont de l'ordre de 600 km/s, ce qui est toujours bien en deçà de la vitesse de la lumière. Les raisons pour lesquelles la Galaxie et le Système solaire se déplacent à ces vitesses « faibles » à travers l'Univers ont déjà été
Défi 334 pe étudiées dans notre excursion. Pouvez-vous en faire une synthèse ?

Par ailleurs, le terme « Univers » est-il approprié ? Est-ce que l'Univers tourne, comme l'indique son étymologie ? Si par Univers nous entendons l'intégralité du milieu qui baigne le cosmos, la question n'a pas de sens, parce que la rotation n'est définie que pour des corps, c'est-à-dire pour des parties de l'Univers. En revanche, si par Univers nous entendons seulement « toute la matière », la réponse *peut* être déterminée par des
Réf. 213 expériences. Il apparaît que cette rotation, si elle existe, est extrêmement petite : des relevés du rayonnement de fond diffus cosmologique montrent qu'au cours de sa durée de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vie l'Univers ne peut pas avoir tourné de plus d'un centième de millionième de tour ! En bref, « Univers » est un terme inapproprié.

La lumière attire-t-elle la lumière ?

Une autre raison pour laquelle nous pouvons admirer les étoiles est que leur lumière nous parvient. Mais pourquoi des rayons lumineux qui voyagent ne sont-ils pas perturbés par l'action gravitationnelle de tous les autres rayons ? Nous savons que la lumière est de l'énergie et que toute énergie en attire d'autres par le truchement de la gravitation. En particulier, la lumière est de l'énergie électromagnétique, et des expériences ont montré que toute énergie électromagnétique est soumise à la gravitation. Deux faisceaux lumineux qui avancent en formant un angle minuscule entre eux peuvent-ils converger à cause de leur attraction gravitationnelle mutuelle ? Cela pourrait avoir des effets mesurables et peut-être intéressants sur la lumière observée, provenant des astres lointains.

La manière la plus simple d'aborder ce problème consiste à étudier la question suivante : des faisceaux lumineux parallèles restent-ils parallèles ? De manière captivante, un calcul précis indique que cette gravitation réciproque n'altère *pas* la trajectoire de
Réf. 214 deux rayons lumineux parallèles, même si elle altère *vraiment* la trajectoire de rayons lumineux antiparallèles*. La raison est que, pour des rayons parallèles se déplaçant à la vitesse de la lumière, la composante gravitomagnétique *annule* exactement la composante
Défi 335 pe gravitoélectrique.

Puisque la lumière n'attire pas la lumière qui se déplace avec elle, elle n'est pas dérangée par sa gravité durant les millions d'années qu'elle met pour parvenir jusqu'à nous depuis les astres lointains. La lumière n'attire ni ne perturbe la lumière se propageant à côté d'elle. Jusqu'à présent, tous les effets connus de la mécanique quantique ont également confirmé cette conclusion.

La lumière se désintègre-t-elle ?

Dans la section sur la théorie quantique, nous rencontrerons des expériences démontrant que la lumière est constituée de particules. Il est plausible que ces photons puissent *se désintégrer* en d'autres particules, encore non découvertes, ou en photons de plus basse fréquence. Si cela se produisait réellement, nous ne pourrions pas observer les étoiles lointaines.

Mais toute désintégration signifierait aussi que la lumière change de direction (pour-
Défi 336 pe quoi ?) et donc qu'elle engendre des images voilées des objets distants. Toutefois, nous n'observons aucun flou. En outre, le physicien soviétique Matvey Bronstein mit en évidence dans les années 1930 le fait que tout processus de désintégration de la lumière
Réf. 215 engendrerait une décroissance plus importante pour les basses fréquences. Lorsque le décalage des ondes radio a été vérifié, en particulier celui de la fameuse raie de 21 cm, et qu'il a été comparé au décalage de la lumière issue de la même source, aucune différence n'a été décelée pour chacune des galaxies examinées.

Certains ont même vérifié que la constante de structure fine de Sommerfeld, qui dé-
Réf. 216 termine la couleur des objets, ne varie pas au cours du temps. Hormis une prétention erronée datant de ces dernières années, aucun changement n'a pu être détecté sur des

* Des rayons antiparallèles sont des rayons parallèles voyageant dans des directions opposées.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

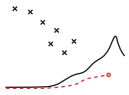
milliards d'années.

Bien entendu, au lieu de se désintégrer, la lumière pourrait également être *frappée* par une certaine entité encore inconnue. Mais cette éventualité est exclue pour les mêmes raisons. Ces investigations montrent également qu'il n'existe aucun mécanisme de décalage vers le rouge supplémentaire dans la nature, mis à part les décalages Doppler et gravitationnel.

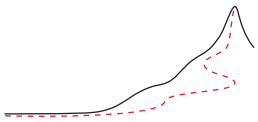
Défi 337 pe

Page 228

L'observation des étoiles la nuit a permis en réalité de lever le voile sur de nombreuses propriétés de la nature. Nous continuons dorénavant notre ascension montagneuse avec un sujet plus général, plus proche de notre quête des principes fondamentaux qui régissent le mouvement.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 6

TROUS NOIRS – L'ÉTERNELLE CHUTE

> « Qui iacet in terra non habet unde cadat*. »
> Alanus de Insulis

Pourquoi étudier les trous noirs ?

Les trous noirs sont les phénomènes gravitationnels les plus extrêmes. Ils atteignent la limite de la nature concernant la longueur divisée par la masse. Ils produisent la valeur de la force la plus élevée possible dans la nature ; par conséquent, ils engendrent de fortes courbures de l'espace-temps. Ainsi, les trous noirs ne peuvent pas être étudiés *sans* l'aide de la relativité générale. De surcroît, leur étude constitue un cheminement essentiel vers l'unification et la description définitive du mouvement.

« Trou noir » est un raccourci pour dire « objet dont l'effondrement gravitationnel est
Réf. 109 achevé ». Pendant de nombreuses années, nous n'avons pas vraiment su s'ils existaient ou non. Mais les données expérimentales disponibles ont maintenant conduit la plupart des spécialistes à conclure qu'un trou noir est logé au centre de la majorité des galaxies, y
Réf. 217 compris la nôtre. L'existence des trous noirs est également suspectée au cœur des quasars et des sursauts gamma. Il semble que l'évolution des galaxies et celle des trous noirs soient fortement corrélées. De plus, une demi-douzaine de trous noirs plus petits ont été identifiés un peu partout dans notre galaxie. Pour ces raisons et beaucoup d'autres, les trous noirs, les systèmes les plus impressionnants, les plus puissants et les plus relativistes
Réf. 218 de la nature, représentent un sujet d'étude fascinant.

Horizons

La vitesse de libération est la vitesse nécessaire pour propulser un projectile de telle manière qu'il ne retombe jamais. Elle dépend de la masse et de la taille de la planète depuis laquelle ce lancer se produit. Que se passe-t-il lorsqu'une planète ou une étoile possède une vitesse de libération supérieure à la vitesse c de la lumière ? Ce type d'objet fut tout d'abord imaginé par le géologue britannique John Michell en 1784, et de manière
Réf. 219 indépendante par le mathématicien français Pierre Laplace en 1795, bien longtemps avant que la relativité générale ne fût développée. Michell et Laplace se rendirent compte de quelque chose de fondamental : même si cet objet ayant une vitesse de libération si élevée était une étoile chaude, il nous apparaîtrait comme étant parfaitement *noir*. Cet objet empêcherait toute lumière de le quitter. De plus, il engloutirait toute la lumière provenant

* « Celui qui est debout sur le sol ne peut tomber plus bas. » Le nom original de l'auteur est Alain de Lille (v. 1128–1203).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 109 de derrière. En 1967, John Wheeler* inventa l'expression, dorénavant consacrée, de *trou noir*.

Un court calcul suffit pour démontrer que la lumière ne peut pas s'échapper d'un corps de masse M, à chaque fois que le rayon est plus petit qu'une valeur critique donnée
Défi 338 pe par

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \tag{267}$$

appelée le *rayon de Schwarzschild*. Cette formule est valide à la fois pour la gravitation universelle et pour la relativité générale, à condition qu'en relativité générale nous considérions que le rayon est équivalent à la circonférence divisée par 2π. Un tel corps atteint la valeur limite concernant le rapport de la longueur par la masse dans la nature. Pour cette raison et pour d'autres qui seront données sous peu, nous appellerons également R_S la *taille* du trou noir de masse M. (Mais remarquez qu'il ne représente que la moitié du diamètre. De plus, le mot « taille » doit être pris avec des pincettes.) En principe, il est possible d'imaginer un objet ayant un rapport longueur sur masse plus petit, mais personne n'en a encore observé un. En fait, nous découvrirons qu'il n'existe aucune façon d'observer un objet plus petit que le rayon de Schwarzschild, de la même manière qu'un objet se déplaçant plus vite que la lumière ne peut être observé. Cependant, nous pouvons observer des trous noirs (indirectement, bien sûr [N.D.T.]) – le cas limite – de la même manière que nous pouvons apercevoir les entités se déplaçant à la vitesse de la lumière.

Lorsqu'une masse s'approche du rayon critique R_S, deux choses se produisent. Premièrement, l'accélération propre locale pour des masses ponctuelles (imaginaires) augmente à l'infini. Pour des objets réalistes de taille finie, le trou noir exerce la force la plus forte possible qui soit dans la nature. Quelque chose qui tombe dans un trou noir ne peut plus en être retiré. Un trou noir engloutit donc toute la matière qui chute dedans. Il agit comme un aspirateur cosmique.

À la surface d'un trou noir, le facteur de décalage vers le rouge pour un observateur éloigné augmente également à l'infini. Le rapport entre ces deux quantités est appelé la
Défi 339 pe *gravité de surface* d'un trou noir. Il est donné par

$$g_{\text{surf}} = \frac{GM}{R_S^2} = \frac{c^4}{4GM} = \frac{c^2}{2R_S} \,. \tag{268}$$

Un trou noir ne permet donc pas à la lumière de s'échapper.

Une surface qui atteint la force limite et un décalage vers le rouge infini rend impossible l'envoi de lumière, de matière, d'énergie ou de signaux de n'importe quel type vers le monde extérieur. Un trou noir est donc entouré par un horizon. Nous savons qu'un horizon est une surface limite. En réalité, un horizon est une frontière, pour deux raisons. Premièrement, un horizon est une limite pour les communications : personne ne peut échanger des informations à travers celui-ci. Deuxièmement, un horizon est une surface

* John Archibald Wheeler (1911–) est un physicien américain, un spécialiste renommé de la relativité générale et l'auteur de plusieurs ouvrages extraordinaires, dont le ravissant JOHN A. WHEELER, *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library & Freeman, 1990, dans lequel il expose avec passion la relativité générale en détail, sans faire appel aux mathématiques.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

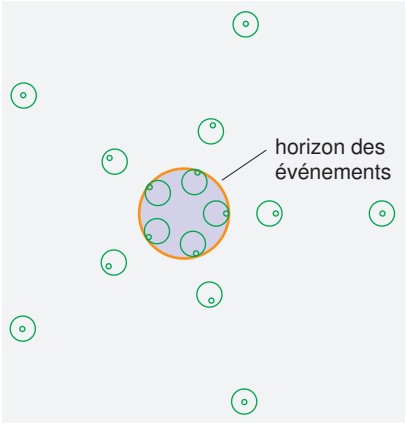


FIGURE 90 Les cônes de lumière situés dans le plan équatorial autour d'un trou noir statique, vus du dessus.

de force et de puissance maximales. Ces propriétés sont suffisantes pour satisfaire toutes les questions concernant les effets dus aux horizons. Par exemple : que se passe-t-il lors-
Défi 340 pe qu'un faisceau lumineux est envoyé vers le haut depuis l'horizon ? Et d'une position située légèrement au-dessus de l'horizon ?

Les trous noirs, considérés comme étant des objets astronomiques, sont donc différents des planètes. Pendant la formation des planètes, la matière s'amoncelle en grumeaux, et tant qu'elle ne peut pas être comprimée davantage un équilibre est trouvé, lequel détermine le rayon de la planète. C'est le même mécanisme qui se produit lorsqu'une pierre est jetée vers la Terre : elle cesse de chuter lorsqu'elle *frappe* le sol. Un « sol » est formé à chaque fois que de la matière heurte une autre matière. Dans le cas d'un trou noir, il n'y a pas de sol, toutes les choses *continuent* de chuter. C'est pourquoi, en langue russe, les trous noirs sont communément appelés des *collapsars**.

Cette chute perpétuelle se produit lorsque la concentration de matière est si importante qu'elle surpasse toutes les interactions qui font que la matière est *impénétrable* dans
Réf. 220 la vie courante. En 1939, Robert Oppenheimer** et Hartland Snyder ont montré qu'en théorie un trou noir se forme à chaque fois qu'une étoile de masse suffisante cesse de brûler. Lorsqu'une étoile suffisamment massive s'éteint, les interactions qui façonnent son « sol » disparaissent, et toutes les choses continuent de chuter *ad vitam aeternam*.

Un *trou noir est de la matière en chute libre permanente*. Néanmoins, son rayon pour un observateur extérieur demeure constant ! Mais ce n'est pas tout. À cause de cette chute libre perpétuelle, les trous noirs représentent le seul état de la matière qui soit en équilibre thermodynamique ! En un certain sens, les sols et tous les autres états quotidiens de la matière sont métastables*** : ces structures ne sont pas aussi stables que les trous noirs.

La propriété caractéristique d'un trou noir est donc son *horizon*. La première fois

* C'est une abréviation de l'expression anglaise « collapsed star » ou « étoile effondrée ». [N.D.T.]

** Robert Oppenheimer (1904–1967) est un important physicien américain. Il peut être désigné comme le père de la physique théorique aux États-Unis. Il travailla sur la théorie quantique et la physique atomique. Il prit alors la tête du groupe qui développa la bombe nucléaire durant la Seconde Guerre mondiale. Il fut également la plus éminente victime (innocente) de l'une des plus grandes « chasses aux sorcières » jamais organisées dans son propre pays. Consultez aussi le site books.nap.edu/openbook.php?record_id=5737&page=175.

*** C'est-à-dire qu'ils sont cinétiquement stables mais pas thermodynamiquement. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

que nous avons rencontré les horizons, ce fut en relativité restreinte, dans la section sur
Page 84 les observateurs accélérés. Les horizons dus à la gravitation sont analogues au regard de toutes leurs propriétés ; la section sur la force et la puissance maximales en a fourni une première impression. L'unique différence que nous avons relevée est due à l'omission de la gravitation en relativité restreinte. Par conséquent, les horizons dans la nature ne peuvent pas être plats, contrairement à ce qui est suggéré par les remarques des observateurs ponctuels imaginaires supposés exister en relativité restreinte.

Le principe de la force maximale et les équations du champ impliquent tous les deux que l'espace-temps situé autour d'une masse symétrique par rotation (donc qui n'est pas
Page 132 en rotation) et électriquement neutre est décrit par

$$\mathrm{d}i^2 = (1 - \frac{2GM}{rc^2})\mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2\mathrm{d}\varphi^2/c^2 \,. \tag{269}$$

C'est la *métrique de Schwarzschild*. Comme mentionné ci-dessus, r est la circonférence divisée par 2π, t est le temps mesuré à l'infini. Jamais un observateur *extérieur* ne recevra un signal quelconque émis depuis un rayon de valeur $r = 2GM/c^2$ ou inférieure. En fait, puisque le temps propre i d'un observateur situé au rayon r est relié au temps t d'un observateur situé à l'infini via

$$\mathrm{d}i = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}\,\mathrm{d}t \,, \tag{270}$$

nous en déduisons qu'un observateur situé sur l'horizon devrait avoir un temps propre évanescent. Autrement dit, à l'horizon le décalage vers le rouge est infini. (En fait, la surface de décalage vers le rouge infini et l'horizon coïncident uniquement pour des trous noirs statiques. Pour des trous noirs en rotation, les deux surfaces sont distinctes.) Tout ce qui se passe sur l'horizon progresse avec une lenteur infinie, comme le remarque un observateur éloigné. En d'autres termes, pour un observateur distant qui examine ce qui se passe sur l'horizon lui-même, absolument rien ne se produit jamais.

De la même façon que des observateurs ne peuvent pas atteindre la vitesse de la lumière, ceux-ci ne peuvent pas parvenir à un horizon. Pour un deuxième observateur, la seule chose qui puisse se produire est que le premier se déplace presque aussi vite que la lumière. De la même manière, pour un deuxième observateur, la seule chose qui puisse se produire est que le premier ait presque atteint l'horizon. De surcroît, un voyageur ne peut pas savoir de combien il se rapproche de la vitesse de la lumière pour un autre, et ressent la vitesse de la lumière comme étant inaccessible. De la même manière, un voyageur (dans un vaste trou noir) ne peut pas avoir une idée de combien il est proche d'un horizon et imagine que ce dernier est inaccessible.

En relativité générale, on prédit que les horizons, quels que soient leurs types, sont *noirs*. Puisque la lumière ne peut s'en échapper, les horizons classiques sont des surfaces parfaitement sombres. En fait, les horizons sont les entités les plus ténébreuses qui puissent être imaginées : rien dans la nature n'est plus sombre. Néanmoins, nous découvrirons plus tard que les horizons physiques ne sont pas complètement noirs.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

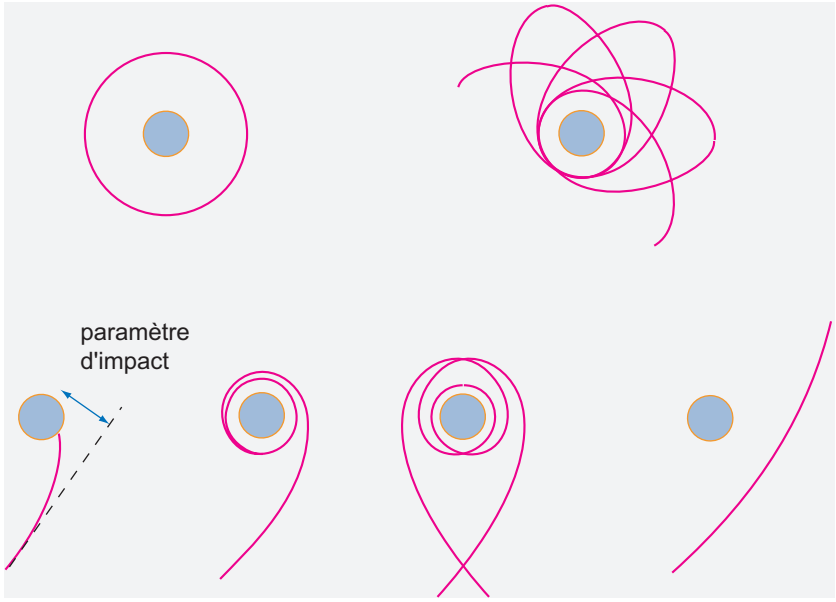


FIGURE 91 Mouvements d'objets non chargés tournant autour d'un trou noir statique – pour différents paramètres d'impact et vitesses initiales.

ORBITES

Réf. 215 Puisque les trous noirs courbent vigoureusement l'espace-temps, un corps se déplaçant au voisinage d'un trou noir se comporte de manière beaucoup plus complexe que prévu par la gravitation universelle. Dans celle-ci, les trajectoires sont des ellipses, des paraboles ou des hyperboles, qui sont toutes des courbes planes. Il apparaît que les trajectoires se situent dans un plan, uniquement près des trous noirs *qui ne sont pas en rotation**.

Autour des trous noirs statiques, également appelés *trous noirs de Schwarzschild*, les trajectoires circulaires sont impossibles pour des rayons inférieurs à $3R_S/2$ (pouvez-vous
Défi 342 pe montrer pourquoi ?) et sont instables si elles sont soumises à des perturbations allant de cette valeur jusqu'à un rayon de $3R_S$. Les orbites circulaires ne sont stables qu'à des rayons plus importants. Autour des trous noirs, il n'existe pas de trajectoire elliptique, le trajet correspondant en forme de rosace est indiqué sur la Figure 91. Une telle trajectoire révèle la célèbre avancée du périastre dans toute sa splendeur.

Remarquez que le potentiel situé autour d'un trou noir n'est pas significativement
Défi 343 pe différent de $1/r$ pour des distances supérieures à environ quinze rayons de Schwarzschild. Pour un trou noir de la masse du Soleil, cela se situerait à 42 km de son centre : par conséquent, nous ne serions pas en situation de déceler une différence quelconque dans

* Pour de telles trajectoires, la loi de Kepler reliant la distance moyenne à la période de l'orbite

$$\frac{GMt^3}{(2\pi)^2} = r^3 \tag{271}$$

Défi 341 pe reste valable, à condition que l'on considère que le temps propre et le rayon soient mesurés par un observateur lointain.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

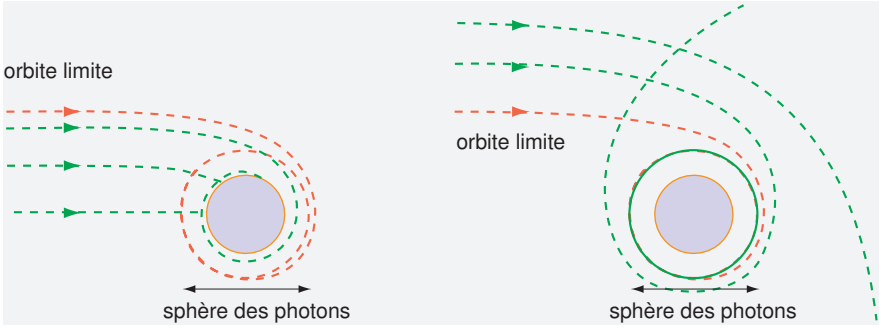


FIGURE 92 Mouvements de la *lumière* s'approchant d'un trou noir statique.

la course de la Terre autour du Soleil.

Nous avons mentionné à plusieurs reprises au cours de notre aventure que la gravitation est caractérisée par ses effets de marée. À cet égard, les trous noirs exhibent des propriétés extrêmes. Si un nuage de poussière tombe dans un trou noir, la taille de ce nuage augmente au cours de sa chute, jusqu'à ce que celui-ci enveloppe l'horizon tout entier. En fait, ce résultat est valable pour n'importe quel corps étendu. Cette propriété des trous noirs sera d'une importance cruciale plus tard, lorsque nous discuterons de la taille des particules élémentaires.

Pour des corps qui chutent depuis un lieu infiniment éloigné, la situation à proximité des trous noirs est encore plus remarquable. Naturellement, il n'y a pas de trajectoire hyperbolique, seuls des trajets analogues aux hyperboles se présentent dans le cas de corps s'approchant de manière suffisamment distante. Pour des paramètres d'impacts réduits, mais pas trop petits, un corps effectuera un certain nombre de révolutions autour du trou noir, avant de le quitter à nouveau. Ce nombre de révolutions augmente indéfiniment avec la réduction du paramètre d'impact, jusqu'à ce qu'une valeur soit atteinte pour laquelle le corps est capturé à l'intérieur d'une orbite d'un rayon $2R$, comme indiqué sur la Figure 91. Autrement dit, cette orbite *capture* des corps qui s'approchent s'ils la frôlent en deçà d'un certain angle critique. À ce propos, souvenez-vous que dans la gravitation universelle la capture n'est jamais possible. Pour des paramètres d'impacts encore plus petits, le trou noir engloutit l'objet qui se frotte à lui. Dans les deux cas – la capture et la déviation –, un corps peut faire plusieurs tours autour du trou noir, tandis que dans la gravitation universelle il est impossible de faire plus d'un *demi*-tour autour d'un corps.

Cependant, les orbites qui paraissent les plus insensées sont celles qui correspondent
Défi 344 pe au cas parabolique de la gravitation universelle. (Celles-ci sont d'intérêt purement académique, puisqu'elles se produisent avec une probabilité nulle.) En résumé, la relativité altère radicalement les mouvements dus à la gravité.

Autour d'un trou noir *en rotation*, les orbites de masses ponctuelles sont encore plus complexes que celles indiquées dans la Figure 91. Pour des mouvements adéquats, par exemple, les ellipses ne se tiennent plus dans un seul plan – à cause de l'effet Thirring–Lense –, engendrant ainsi des orbites particulièrement enchevêtrées dans les trois dimensions qui emplissent l'espace autour du trou noir.

Pour la *lumière* passant à proximité d'un trou noir, les trajectoires formées sont éga-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lement intéressantes, comme indiqué sur la Figure 92. Il n'existe pas de distinction qualitative avec le cas des particules rapides. Pour un trou noir statique, le trajet se déroule évidemment dans un seul plan. Naturellement, si la lumière passe assez près, elle peut être fortement courbée, ou même capturée. À nouveau, la lumière peut aussi faire un ou plusieurs tours autour du trou noir avant de repartir ou d'être capturée. La limite entre les deux situations est représentée par la trajectoire dans laquelle la lumière décrit un cercle autour d'un trou noir, à $3R/2$. Si nous étions situés sur cette orbite, nous verrions
Défi 345 pe l'arrière de notre tête en regardant vers l'avant ! Toutefois, cette orbite est instable. La surface contenant toutes les orbites situées à l'intérieur de celle qui est circulaire est appelée la *sphère des photons*. Celle-ci départage donc les trajectoires conduisant à la capture de celles conduisant à une position toujours éloignée. Remarquez qu'il n'existe aucune orbite *stable* pour la lumière autour d'un trou noir. Existe-t-il des trajectoires en forme de
Défi 346 pe rosace pour la lumière tournant autour d'un trou noir ?

Pour la lumière orbitant autour d'un trou noir *en rotation*, les courbes sont beaucoup plus complexes. Rien que dans le plan équatorial, il existe deux trajectoires circulaires possibles pour la lumière : la plus petite est dans le sens de rotation et la plus grande
Défi 347 pe tourne dans le sens opposé.

Pour des trous noirs *chargés*, les orbites décrites par des particules chargées en chute sont encore plus alambiquées. Les lignes du champ électrique doivent être prises en considération. Plusieurs effets fascinants surgissent, lesquels n'ont aucun équivalent avec l'électromagnétisme classique, comme des effets similaires à des versions électriques de l'effet Meissner. Le comportement de ces orbites constitue toujours un domaine de recherches en pleine effervescence de la relativité générale.

Entropie et cheveux

Comment un trou noir est-il caractérisé ? Il apparaît que toutes les propriétés des trous noirs découlent d'un petit nombre de quantités élémentaires qui les déterminent, à savoir la masse M, le moment cinétique J et la charge électrique Q*. Toutes les autres propriétés – telles que la taille, la forme, la couleur, le champ magnétique – sont déterminées de manière unique par celles-ci**. C'est comme si, pour employer l'analogie imagée de Wheeler, nous pouvions déduire chaque trait particulier d'une femme à partir de ses dimensions, de sa taille et de sa hauteur. Les physiciens disent aussi que les trous noirs « n'ont pas de cheveux », sous-entendant par là que les trous noirs (classiques) ne possèdent aucun autre degré de liberté. Cette expression fut également introduite par Whee-

* L'existence de trois caractéristiques fondamentales n'est pas sans rappeler le monde des particules. Nous en découvrirons plus concernant le rapport qui existe entre les trous noirs et les particules dans la dernière partie de notre ascension montagneuse.

** Principalement pour des raisons de reconnaissance vis-à-vis de leurs découvreurs, les trous noirs statiques et électriquement neutres sont souvent appelés trous noirs de *Schwarzschild*, ceux en rotation et non chargés
Réf. 221 sont fréquemment appelés trous noirs de *Kerr*, d'après Roy Kerr, qui découvrit les solutions correspondantes des équations du champ d'Einstein en 1963. Des trous noirs électriquement chargés mais statiques sont couramment appelés trous noirs de *Reissner–Nordström*, d'après le physicien allemand Hans Reissner et le physicien finlandais Gunnar Nordström. Le cas général, chargé et en rotation, est parfois baptisé des noms
Réf. 222 de Kerr et Newman.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 223 ler*. Cette idée a été démontrée par Israel, Carter, Robinson et Mazur : ils ont montré que, pour une masse, un moment cinétique et une charge donnés, il existe *un seul* trou noir
Réf. 224 possible. (Cependant, ce théorème d'unicité n'est plus valable si le trou noir comporte des nombres quantiques nucléaires, telles des charges faibles ou fortes.)

En d'autres termes, un trou noir est indépendant de la manière dont il s'est formé et du type de matière utilisé lors de sa formation. Les trous noirs ont tous la même composition ou, mieux, ils n'ont pas de composition du tout (du moins classiquement).

La masse M d'un trou noir n'est pas limitée par la relativité générale. Elle peut être aussi petite que celle d'une particule microscopique et aussi vaste que plusieurs millions de masses solaires. Mais pour le moment cinétique J et la charge électrique Q, la situation est différente. Un trou noir en rotation possède un moment cinétique maximal possible et une charge électrique (et magnétique) maximale possible**. La limitation du moment cinétique apparaît parce que son périmètre ne peut pas bouger plus vite que la lumière. La
Défi 348 pe charge électrique est également restreinte. Ces deux limites ne sont pas indépendantes : elles sont reliées par

$$\left(\frac{J}{cM}\right)^2 + \frac{GQ^2}{4\pi\varepsilon_0 c^4} \leqslant \left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 \quad . \tag{272}$$

Cela découle de la limite des rapports entre longueur et masse à la base de la relativité
Défi 349 pe générale. Les trous noirs en rotation parvenant à la limite (272) sont baptisés trous noirs *extrémaux*. Cette limite (272) implique que le rayon de l'horizon d'un trou noir en général est donné par

$$r_\mathrm{h} = \frac{GM}{c^2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{J^2c^2}{M^4G^2} - \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 GM^2}}\right) \tag{273}$$

Par exemple, pour un trou noir doté de la masse du Soleil et de la moitié de son moment cinétique, à savoir $2 \cdot 10^{30}$ kg et $0{,}45 \cdot 10^{42}\,\mathrm{kg\,m^2/s}$, la charge limite est d'environ $1{,}4 \cdot 10^{20}$ C.

Comment distinguons-nous les trous noirs en rotation de ceux qui sont statiques ? En tout premier lieu par leur *forme*. Des trous noirs statiques doivent être sphériques (toute
Réf. 225 non-sphéricité est diffusée dans l'espace sous forme d'ondes gravitationnelles) et des trous noirs en rotation possèdent une forme légèrement aplatie, uniquement déterminée par le moment cinétique. À cause de leur rotation, leur surface de gravité infinie ou de décalage vers le rouge infini, appelée la *limite statique*, est différente de leur horizon (externe). La région située entre les deux est baptisée l'*ergosphère*, un terme mal approprié puisque ce n'est *pas* une sphère. (Elle est appelée ainsi parce que, comme nous le verrons bientôt, elle peut être utilisée pour extraire de l'énergie du trou noir.) Le mouvement des corps situés dans l'ergosphère peut être assez compliqué. Il suffit de mentionner que

Réf. 109 * Wheeler prétendit qu'il fut inspiré par la difficulté à faire des distinctions entre des hommes chauves ; cependant, Feynman, Ruffini et d'autres avaient une image anatomique claire dans leur esprit lorsqu'ils affirmaient que « les trous noirs, contrairement à leur voisinage, n'ont pas de cheveux ».

Page 41 ** Nous en dirons plus à propos de la charge magnétique toujours hypothétique. Dans les trous noirs, elle est introduite comme un type supplémentaire de charge dans toutes les expressions où la charge électrique apparaît.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

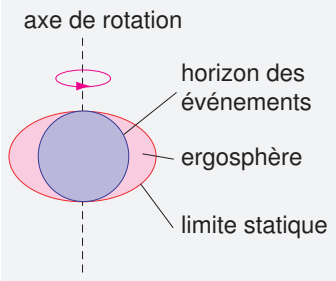


FIGURE 93 L'ergosphère d'un trou noir en rotation.

des trous noirs en rotation entraînent tout corps qui chute dedans vers une orbite qui les encercle, ce qui est en contradiction avec les trous noirs statiques, qui avalent les corps chutant vers eux. Autrement dit, des trous noirs en rotation ne sont pas vraiment des « trous », mais plutôt des tourbillons.

La distinction entre des trous noirs rotatifs et statiques se manifeste également par l'aire de l'horizon. L'aire A (de l'horizon) d'un trou noir statique et non chargé est
Défi 350 e trivialement reliée à sa masse M par

$$A = \frac{16\pi G^2}{c^4} M^2 \,. \tag{274}$$

La relation entre l'aire et la masse pour un trou noir rotatif et chargé est plus complexe : elle est donnée par

$$A = \frac{8\pi G^2}{c^4} M^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{J^2 c^2}{M^4 G^2} - \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 G M^2}}\right) \tag{275}$$

où J représente le moment cinétique et Q la charge. En fait, la relation

$$A = \frac{8\pi G}{c^2} M r_\mathrm{h} \tag{276}$$

est valide pour *tous* les trous noirs. Manifestement, dans le cas d'un trou noir électriquement chargé, la rotation engendre également un champ magnétique autour de celui-ci. Cela contraste avec les trous noirs statiques, qui ne peuvent pas avoir de champ magnétique.

LES TROUS NOIRS COMME SOURCES D'ÉNERGIE

Pouvons-nous extraire de l'énergie d'un trou noir ? Roger Penrose a découvert que
Réf. 226 c'est possible pour des trous noirs *en rotation*. Une fusée gravitant autour d'un tel trou noir, dans son ergosphère, pourrait allumer ses moteurs et serait alors propulsée dans l'espace extérieur au trou noir à une vitesse gigantesque, beaucoup plus importante que celle que les moteurs pourraient eux-mêmes produire. En réalité, les fusées sur la Terre tirent profit du même effet, et c'est la raison pour laquelle tous les satellites en orbite au-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tour de la Terre gravitent dans la même direction. Il faudrait beaucoup plus de carburant pour les faire tourner dans l'autre sens*.

L'énergie gagnée par la fusée serait perdue par le trou noir, qui serait alors ralenti et perdrait un peu de sa masse. D'un autre côté, il y aurait une augmentation de masse due aux gaz d'échappement tombant dans le trou noir. Cette augmentation est toujours supérieure, ou au mieux égale, à la perte due au ralentissement de la rotation. Le mieux que nous puissions faire consiste à mettre les moteurs en marche exactement à l'horizon, car alors l'aire de l'horizon du trou noir demeure constante, et seule sa rotation est ralentie**.

Ainsi, pour un trou noir neutre *en rotation* ayant un moment cinétique égal au maximum possible, $1-1/\sqrt{2} = 29{,}3\,\%$ de son énergie totale peut être extraite par le truchement de la procédure de Penrose. Pour des trous noirs tournant plus lentement, ce pourcentage est évidemment plus petit.

Défi 352 pe

En ce qui concerne les trous noirs *chargés*, de tels procédés d'extraction irréversibles de l'énergie sont également possibles. Pouvez-vous en imaginer un exemple ? En utilisant l'expression (272), nous trouvons que jusqu'à 50 % de la masse d'un trou noir statique peut être due à sa charge. En fait, dans la partie quantique de notre aventure, nous rencontrerons un procédé d'extraction de l'énergie que la nature semble employer très fréquemment.

Défi 353 pe

Défi 354 pe

Page ??

La procédure de Penrose nous permet de déterminer comment le moment cinétique et la charge accroissent la masse d'un trou noir. Le résultat est la célèbre relation masse–énergie

Réf. 227

$$M^2 = \frac{E^2}{c^4} = \left(m_{\text{irr}} + \frac{Q^2}{16\pi\varepsilon_0 G m_{\text{irr}}}\right)^2 + \frac{J^2}{4m_{\text{irr}}^2}\frac{c^2}{G^2} = \left(m_{\text{irr}} + \frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_0 \rho_{\text{irr}}}\right)^2 + \frac{J^2}{\rho_{\text{irr}}^2}\frac{1}{c^2} \qquad (277)$$

qui montre comment l'énergie électrostatique et l'énergie rotationnelle se joignent à la masse d'un trou noir. Dans cette expression, m_{irr} est la *masse irréductible* définie comme

$$m_{\text{irr}}^2 = \frac{A(M, Q = 0, J = 0)}{16\pi}\frac{c^4}{G^2} = \left(\rho_{\text{irr}}\frac{c^2}{2G}\right)^2 \qquad (278)$$

et ρ_{irr} est le *rayon irréductible*.

Des examens minutieux révèlent qu'il n'existe pas de procédé qui permette de *diminuer* l'aire de l'horizon, et donc la masse ou le rayon irréductible, du trou noir. Nous l'avons vérifié de toutes les manières possibles et imaginables. Par exemple, lors de la coalescence de deux trous noirs, la surface totale augmente. Nous qualifions les processus qui conservent l'aire et l'énergie du trou noir à une valeur constante de *réversibles*, et tous les autres d'irréversibles. En fait, l'aire des trous noirs se comporte comme l'*entropie* d'un

* Et cela serait beaucoup plus dangereux, puisque n'importe quel objet minuscule heurterait un tel satellite avançant à contre-courant à environ 15,8 km/s, transformant ainsi cet objet en un redoutable projectile. En réalité, toute puissance désirant anéantir les satellites de l'ennemi aurait simplement besoin de charger un satellite d'écrous ou de boulons, de l'expédier dans l'espace à contresens et de disperser les boulons sous forme de nuage. Cela empêcherait les satellites de parvenir sur cette orbite pendant de nombreuses décennies.

Défi 351 pe

** Il est également possible d'extraire de l'énergie des trous noirs en rotation grâce au rayonnement gravitationnel.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

système isolé : elle ne décroît jamais. Jakob Bekenstein a, le premier, formulé en 1970 que
Réf. 228 cette aire *représente* en fait une entropie. Il en a déduit que ce n'est que lorsqu'une entropie est attribuée à un trou noir qu'il est possible de comprendre où se retrouve l'entropie de toute la matière chutant dedans.

L'entropie du trou noir est une fonction uniquement de la masse, du moment cinétique et de la charge de celui-ci. Vous devriez pouvoir confirmer la déduction de Bekenstein que l'entropie S est proportionnelle à l'aire de l'horizon. Plus tard on a découvert, en utilisant la théorie quantique, que

Défi 355 pe

$$S = \frac{A}{4}\frac{kc^3}{\hbar G} = \frac{A\,k}{4\,l_{\mathrm{Pl}}^2} \,. \tag{279}$$

Cette célèbre relation ne peut pas être retrouvée sans l'aide de la théorie quantique, puisque la valeur absolue de l'entropie, comme toute autre observable, n'est jamais déterminée uniquement par la physique classique. Nous discuterons de cette expression plus
Page ?? tard dans notre ascension montagneuse.

Si les trous noirs possèdent une entropie, alors ils doivent aussi avoir une température. S'ils ont une température, ils doivent briller. Les trous noirs ne peuvent donc pas être noirs ! Cela fut démontré par Stephen Hawking en 1974 à l'aide de calculs extrêmement compliqués. Néanmoins, cela pourrait avoir été imaginé dans les années 1930, à
Page ?? l'aide d'une simple expérience de pensée que nous présenterons plus loin. Vous devriez pouvoir réfléchir à ce problème, en vous demandant et en recherchant quelles conséquences étranges surgiraient si les trous noirs n'avaient pas d'entropie. Le rayonnement des trous noirs est un mécanisme (quantique) supplémentaire, bien que minuscule, d'extraction de l'énergie, qui est même applicable à ceux qui sont statiques et non chargés.
Page ?? Les connexions intéressantes qui existent entre les trous noirs, la thermodynamique et la théorie quantique seront exposées dans les prochaines parties de notre excursion montaDéfi 356 pe gneuse. Pouvez-vous imaginer d'autres mécanismes qui font que les trous noirs brillent ?

Curiosités et défis amusants concernant les trous noirs

> « Tiens, les trous noirs. C'est troublant. »
>
> Anonyme

Les trous noirs possèdent un grand nombre de propriétés contre-intuitives. Nous jetterons tout d'abord un coup d'œil aux effets classiques, gardant les effets quantiques pour
Page ?? plus tard.

* *

D'après la gravitation universelle, la lumière pourrait, depuis la surface d'un trou noir, grimper vers le haut puis retomber en arrière. En relativité générale, un trou noir ne permet nullement à la lumière de grimper vers le haut, elle ne peut que tomber. Pouvez-
Défi 357 pe vous démontrer cette assertion ?

* *

Qu'est-ce qui arrive à un individu chutant dans un trou noir ? Un observateur extérieur

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

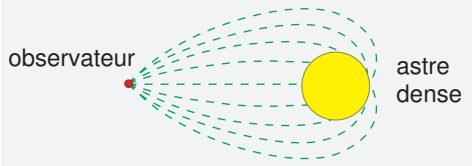


FIGURE 94 Trajectoire de quelques rayons lumineux provenant d'un corps massif et se dirigeant vers un observateur.

en donne une réponse claire : la personne qui tombe n'y parvient *jamais* puisqu'elle a besoin d'une durée infiniment longue pour atteindre l'horizon. Pouvez-vous confirmer
Défi 358 pe ce résultat ? Celui qui chute, cependant, parvient à l'horizon au bout d'une quantité *finie*
Défi 359 pe de son temps. Pouvez-vous la calculer ?

Ce résultat est surprenant, car il signifie que, pour un observateur extérieur situé dans un Univers ayant un âge *fini*, les trous noirs ne peuvent pas encore s'être formés ! Au mieux, nous ne pouvons observer que des systèmes qui sont en train de donner naissance aux trous noirs. Dans un sens, il pourrait être correct d'affirmer que les trous noirs n'existent pas. Ceux-ci pourraient bien avoir existé dès le début de la création de l'espace-temps. D'un autre côté, nous découvrirons plus tard pourquoi cela est impossible. En bref, il est primordial de bien garder à l'esprit que l'idée de trou noir représente un concept théorique idéal mais que, généralement, ces concepts limites (comme les bains thermiques ou la température) constituent des descriptions pertinentes de la nature. Indépendamment de ce dernier problème, nous pouvons confirmer que, dans la nature, le rapport de la longueur par la masse vérifie toujours

$$\frac{L}{M} \geqslant \frac{4G}{c^2} \,. \tag{280}$$

* *

Il est intéressant de noter que la *taille* d'un individu dégringolant dans un trou noir est évaluée de manière radicalement différente par celui qui chute et par une personne qui demeure à l'extérieur. Si le trou noir est vaste, l'observateur chutant dedans ne ressent presque rien, tellement les forces de marée sont faibles. L'observateur extérieur fait une remarque effrayante : il observe que la personne qui chute *s'étale* sur toute la surface de l'horizon du trou noir. *Des corps étendus qui tombent recouvrent l'horizon tout entier.* Pouvez-vous expliciter cette situation, par exemple en utilisant la limite des rapports de
Défi 360 pe la longueur sur la masse ?

Ce résultat bizarre, qui sera essentiel plus loin dans notre exploration, conduira à des résultats importants concernant la taille des particules ponctuelles.

* *

Un observateur situé près d'un trou noir (statique), ou en fait à proximité de n'importe quel objet de taille inférieure à 7/4 de son rayon gravitationnel, peut même apercevoir la face *cachée* entière de l'objet, comme indiqué sur la Figure 94. Pouvez-vous imaginer à
Défi 361 pe quoi ressemblerait cette image ? Remarquez qu'en plus des trajectoires représentées sur la Figure 94 la lumière peut également tourner plusieurs fois autour du trou noir avant de parvenir à l'observateur ! Par conséquent, un tel observateur voit un nombre infini d'images du trou noir. La formule résultante concernant la taille angulaire de l'image la

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Page 145 plus proche de l'horizon a été donnée plus haut.

En réalité, l'effet de la gravité signifie qu'il est possible de voir davantage que la moitié de la surface d'un objet sphérique *quelconque*. Dans la vie de tous les jours, cependant, cet effet est imperceptible : par exemple, la courbure de la lumière nous permet d'observer à peu près 50,0002 % de la surface du Soleil.

* *

Une masse ponctuelle située à l'intérieur de la plus petite trajectoire circulaire de la lumière autour d'un trou noir, à $3R/2$, ne peut pas demeurer sur une orbite circulaire parce que, dans cette région, il se produit quelque chose de déconcertant. Un corps qui encercle un autre corps dans la vie courante ressent constamment une tendance à être poussé vers l'extérieur, cette force centrifuge étant due à l'inertie du corps en question. Mais pour des valeurs inférieures à $3R/2$, un corps qui décrit un cercle est poussé *vers l'intérieur* Réf. 229 par son inertie. Il existe plusieurs méthodes pour expliquer cet effet contradictoire. La plus simple consiste à remarquer que, près d'un trou noir, le poids augmente plus vite Défi 362 pe que la force centrifuge, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Seule une fusée ayant ses moteurs allumés et fonçant dans la direction du ciel peut graviter autour d'un trou noir à $3R/2$.

* *

D'autre part, comment la gravité ou un champ électrique peuvent-ils s'échapper d'un Défi 363 s trou noir si aucun signal et aucune énergie ne peuvent en sortir ?

* *

Les *trous blancs*, c'est-à-dire des trous noirs inversés par rapport au temps, dans lesquels tout s'écoule vers l'extérieur, au lieu de l'intérieur, d'une certaine région délimitée, Défi 364 pe existent-ils ?

* *

Montrez qu'une constante cosmologique Λ conduit à la métrique suivante pour un trou Défi 365 pe noir :

$$\mathrm{d}\tau^2 = \frac{\mathrm{d}s^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{\Lambda}{3}r^2\right)\mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{c^2 - \frac{2GM}{r} - \frac{\Lambda c^2}{3}r^2} - \frac{r^2}{c^2}\mathrm{d}\varphi^2 \,. \tag{281}$$

Remarquez que cette métrique ne se transforme pas en métrique de Minkowski pour des valeurs importantes de r. Toutefois, dans le cas où Λ est petit, la métrique est presque plate pour des valeurs de r qui vérifient $1/\sqrt{\Lambda} \gg r \gg 2Gm/c^2$.

Ainsi, la loi en l'inverse du carré est également modifiée :

$$F = -\frac{Gm}{r^2} + \frac{c^2\Lambda}{6}r \,. \tag{282}$$

Avec les valeurs connues de la constante cosmologique, le deuxième terme est négligeable à l'intérieur du Système solaire.

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Dans la théorie quantique, le *rapport gyromagnétique* représente une quantité cruciale pour tout système chargé en rotation. Quel est le rapport gyromagnétique pour des trous noirs rotatifs ?

Défi 366 pe

* *

Un vaste trou noir est, comme son nom l'indique, noir. Pourtant, il peut être vu. Si nous sommes en train de voyager dans sa direction à bord d'un vaisseau spatial, nous remarquons que le trou noir est entouré d'un cercle lumineux, telle une mince auréole. L'anneau, situé à la distance radiale de la sphère des photons, est dû aux photons qui proviennent des autres objets lumineux qui encerclent le trou, et qui achèvent finalement, après un ou plusieurs tours, leur course dans notre œil. Pouvez-vous confirmer ce résultat ?

Défi 367 s

* *

Défi 368 pe Les trous noirs en mouvement subissent-ils une contraction de Lorentz ? Ils doivent briller un tout petit peu. Il est vrai que les images qu'ils engendrent sont complexes, puisque la lumière peut effectuer plusieurs révolutions autour d'eux avant d'atteindre l'observateur. De surcroît, l'observateur doit être très éloigné, de telle sorte que les effets de la courbure soient petits. Tous ces effets peuvent être pris en compte, mais cette question reste épineuse. La raison en est que le concept de contraction de Lorentz n'a aucun sens en relativité générale, puisque la comparaison avec la situation non contractée est difficile à définir précisément.

* *

Défi 369 pe Pouvez-vous confirmer que les trous noirs impliquent une limite à la puissance ? La puissance représente la variation d'énergie par unité de temps. La relativité générale restreint la puissance à $P \leqslant c^5/4G$. Autrement dit, aucune machine dans la nature ne peut fournir plus de $0{,}92 \cdot 10^{52}$ W ou $1{,}2 \cdot 10^{49}$ chevaux-vapeur.

La genèse et la quête des trous noirs

Comment les trous noirs pourraient-ils se former ? Aujourd'hui, au moins trois mécanismes sont plausibles, et cette question constitue toujours un ardent sujet de recherches. En premier lieu, les trous noirs pourraient s'être formés au cours des premières étapes de l'Univers. Ces *trous noirs primordiaux* auraient grossi par le biais de l'*accrétion*, c'est-à-dire par le biais de l'engloutissement de la matière et du rayonnement environnants, ou auraient disparu à travers l'un des mécanismes qui seront étudiés plus tard.

Réf. 230

Page ??

Parmi les trous noirs *observés*, ceux que nous appelons trous noirs *supermassifs* sont localisés au centre de toutes les galaxies étudiées jusqu'ici. Ils ont une masse allant de 10^6 à 10^9 masses solaires et renferment environ 0,5 % de la masse de la galaxie. On conjecture qu'il y en a un au centre de toutes les galaxies, et ils semblent être associés à la formation des galaxies elles-mêmes. Les trous noirs supermassifs sont supposés s'être formés après l'effondrement de vastes nuages de poussière, et avoir grossi grâce à l'accrétion ultérieure de matière. Les idées les plus récentes impliquent que ces trous noirs accumulent une énorme quantité de matière dès leur plus jeune âge. La matière qui chute dedans émet de grandes quantités de rayonnement, ce qui pourrait expliquer l'intense lumino-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sité des quasars. Ensuite, le régime d'accrétion diminue et les galaxies de Seyfert moins spectaculaires se forment. Il se pourrait même que le trou noir supermassif logé au cœur de la galaxie déclenche la formation d'étoiles. Par la suite, ces trous noirs supermassifs deviennent pratiquement inactifs, comme celui situé au centre de la Voie lactée.

D'autre part, les trous noirs peuvent se former lorsque de vieilles étoiles massives
Réf. 231 *s'effondrent*. On estime que, lorsque des étoiles d'au moins trois masses solaires brûlent tout leur carburant, une partie de la matière restante s'effondre pour donner naissance à un trou noir. Un tel trou noir *stellaire* possède une masse comprise entre une et une centaine de masses solaires. Il peut également continuer à grossir par la suite par accrétion. Ce scénario a accouché de la découverte du tout premier candidat plausible de trou noir, Cygnus X-1, en 1971.

Des relevés récents suggèrent également l'existence de trous noirs *intermédiaires*, ayant des masses d'environ un millier de masses solaires ou plus, les mécanismes et les conditions de leur formation étant encore inconnus.

L'identification des trous noirs constitue un sport populaire chez les astrophysiciens. Conceptuellement, la manière la plus simple pour les détecter consiste à rechercher des champs gravitationnels puissants. Mais seules les étoiles binaires nous permettent de mesurer directement des champs gravitationnels, et le plus fort jamais mesuré est à 30 % de
Réf. 232 la valeur théorique maximale. Une autre manière consiste à rechercher des lentilles gravitationnelles puissantes, et de tenter d'obtenir un rapport masse/taille indiquant l'existence d'un trou noir. Une autre manière encore consiste à observer la dynamique des étoiles proches du centre des galaxies. En mesurant leur mouvement, nous pouvons en déduire la masse du corps autour duquel elles gravitent. La méthode favorite pour déceler des trous noirs repose sur l'émission de rayons X extrêmement intenses provenant de sources ponctuelles, en utilisant des satellites spatiaux ou des détecteurs situés dans des ballons atmosphériques. Si la distance à l'objet est connue, sa magnitude absolue* peut être retrouvée. Si celle-ci est supérieure à une certaine limite, l'objet doit être un trou noir puisque la matière ordinaire ne peut pas produire une quantité illimitée de lumière. Cette méthode est en cours de perfectionnement afin de pouvoir observer directement la
Réf. 233 disparition d'énergie dans un horizon. En fait, il se pourrait que cela ait déjà été observé.

Pour résumer la situation expérimentale, les mesures indiquent qu'un trou noir supermassif semble être localisé au centre de toutes les galaxies étudiées jusqu'à présent, soit plus d'une douzaine. Les masses varient : le trou noir au centre de notre galaxie fait
Réf. 217 environ 2,6 millions de masses solaires, alors que le trou noir central de la galaxie M87 fait 3 milliards de masses solaires.

Nous connaissons à peu près une douzaine de trous noirs stellaires compris entre 4 et 20 masses solaires dans l'étendue de notre chère galaxie. Ils ont tous été découverts de-
Réf. 217 puis 1971, date à laquelle Cygnus X-1 a été détecté. En l'an 2000, des trous noirs de masse intermédiaire furent détectés. Les astronomes étudient également quel est le nombre de trous noirs qui se trouvent dans les amas stellaires, à quelle fréquence ils se heurtent, et quelle sorte d'ondes gravitationnelles détectables ces collisions engendrent. On s'attend à ce que la liste des découvertes s'allonge considérablement dans les années à venir.

* La magnitude absolue est une mesure de la luminosité intrinsèque d'un objet céleste. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Singularités

En résolvant les équations de la relativité générale pour diverses conditions initiales, nous remarquons qu'un nuage de poussière s'effondre généralement en une *singularité*, c'est-à-dire en un point de densité infinie. La même conclusion se manifeste lorsque nous suivons l'évolution de l'Univers, en remontant en arrière dans le temps. En fait, Roger Penrose et Stephen Hawking ont démontré plusieurs théorèmes mathématiques concernant la nécessaire existence de singularités pour de nombreuses distributions classiques de matière. Ces théorèmes se fondent uniquement sur la continuité de l'espace-temps
Réf. 234 et sur quelques conditions plutôt faibles concernant la matière située à l'intérieur. Ces théorèmes établissent que dans des systèmes en expansion tels que l'Univers lui-même, ou dans des systèmes en effondrement tels que les trous noirs en formation, des phénomènes de densité matérielle infinie auraient existé quelque part dans le passé, ou, respectivement, existeront dans le futur. Ce résultat est ordinairement résumé en disant qu'il existe une preuve mathématique qui établit que l'Univers naquit sous la forme d'une singularité.

En réalité, la dérivation des singularités initiales crée une hypothèse forte, mais cachée, concernant la matière : ces particules de poussière n'ont pas de taille. En d'autres termes, on suppose que les particules de poussière sont des singularités. Ce n'est qu'à l'aide de cette hypothèse que nous déduisons l'existence de singularités initiales. Toutefois, nous avons vu que le principe de la force maximale peut être reformulé comme un principe de taille minimale pour la matière. L'argument qu'il a dû y avoir une singularité initiale dans l'Univers est donc corrompu. La situation expérimentale est claire : il y a une évidence accablante pour qu'au cours de son plus jeune âge l'Univers ait été prodigieusement chaud et dense, mais il n'y a *aucune* évidence pour une température ou une densité infinies.

Les chercheurs ayant une inclination pour les mathématiques distinguent deux types de singularités : celles avec et celles sans horizon. Les dernières, les singularités *nues*, sont particulièrement étranges : par exemple, une brosse à dents peut tomber dans une singularité nue et disparaître sans laisser de traces. Puisque les équations du champ sont invariantes par renversement du temps, nous pourrions nous attendre à ce que, de temps en temps, des singularités nues recrachent des brosses à dents. (Pouvez-vous expliquer
Défi 370 pe pourquoi des singularités « habillées » sont moins dangereuses ?)

Pour esquiver l'irruption spontanée des brosses à dents, au fil des ans de nombreuses personnes ont tenté de découvrir certains principes théoriques interdisant l'existence de singularités nues. Il apparaît qu'il existe deux principes de cette forme. Le premier est le principe de la force maximale ou de la puissance maximale que nous avons rencontré auparavant. La force maximale implique qu'aucune valeur infinie de force n'apparaît dans la nature ou, autrement dit, qu'il n'existe pas de singularités nues dans la nature.
Réf. 235 Cette déclaration est souvent dénommée la *censure cosmique*. Évidemment, si la relativité générale n'était pas la description correcte de la nature, des singularités nues *pourraient* toujours surgir. La censure cosmique est ainsi toujours discutée dans les articles scientifiques. La quête expérimentale des singularités nues n'a produit aucun résultat ; en fait, il n'y a même pas de candidat observationnel pour les singularités habillées, moins absconses. Mais le cas théorique de l'existence des singularités « habillées » est également faible. Puisqu'il n'existe aucun procédé pour interagir avec quoi que ce soit situé der-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

rière un horizon, il est inutile de discuter de ce qui se passe à cet endroit. Il n'y a pas de voie pour démontrer que derrière un horizon se tient une singularité. Les singularités habillées sont des représentations idéologiques, mais ne concernent pas la physique.

En fait, il existe un autre principe qui empêche l'apparition des singularités, à savoir la *théorie quantique*. À chaque fois que nous rencontrons une prédiction concernant une valeur infinie, nous étendons notre description de la nature à un domaine pour lequel elle n'était pas conçue. Pour parler de singularités, nous devons supposer que la relativité générale pure s'applique aux distances très petites et aux énergies très élevées. Comme
Page ?? cela deviendra clair dans les deux prochaines parties de ce livre, la nature ne le permet pas : l'association de la relativité générale et de la théorie quantique indique qu'il n'y a aucun sens à parler de « singularités », pas plus que de ce qui se passe « à l'intérieur » d'un horizon de trou noir. La raison en est que le temps et l'espace ne sont pas continus
Page ?? aux très petites échelles*.

Un petit quiz : l'Univers est-il un trou noir ?

Se pourrait-il que nous vivions à l'intérieur d'un trou noir ? L'Univers et les trous noirs ont tous les deux des horizons. De manière intéressante, la distance de l'horizon r_0 de l'Univers est d'environ

$$r_0 \approx 3ct_0 \approx 4 \cdot 10^{26}\,\mathrm{m} \tag{283}$$

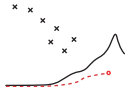
et son contenu en matière est à peu près de

$$m_0 \approx \frac{4\pi}{3}\rho_o r_0^3 \quad \text{d'où} \quad \frac{2Gm_0}{c^2} = 72\pi G\rho_0 c t_0^3 = 6 \cdot 10^{26}\,\mathrm{m} \tag{284}$$

pour une densité de $3 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg/m^3}$. Nous avons donc

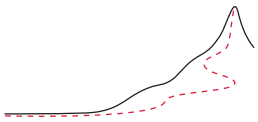
$$r_0 \approx \frac{2Gm_0}{c^2}\,, \tag{285}$$

Défi 371 pe ce qui est équivalent à la relation du trou noir $r_S = 2Gm/c^2$. Est-ce une coïncidence ? Non, ce n'en est pas une : tous les systèmes ayant une forte courbure obéissent plus ou moins à cette relation. Mais sommes-nous néanmoins en train de chuter dans un énorme
Défi 372 pe trou noir ? Vous pouvez répondre à cette question par vous-même.



* De nombreux physiciens sont toujours prudents avant de faire de tels postulats fondamentaux à ce niveau, et il y en a toujours un certain nombre qui proclament que l'espace et le temps sont continus même jusqu'aux distances les plus petites. Notre discussion sur la théorie quantique, et les premières sections de la dernière
Page ?? partie de notre ascension de la montagne, nous donneront les arguments décisifs conduisant à la conclusion opposée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 7

L'ESPACE DIFFÈRE-T-IL DU TEMPS ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

« Tempori parce*. »
Sénèque

Les gens disent, sur un ton résigné, que le temps est notre souverain. Personne ne dit une telle chose pour l'espace. Le temps et l'espace sont manifestement distincts dans la vie quotidienne. Mais quelle est précisément cette différence en relativité générale ? Et après tout, avons-nous besoin d'eux ? En relativité générale, il est supposé que nous vivons dans un espace-temps (pseudo-riemannien) de courbure variable. La courbure est une observable, qui est reliée à la distribution et au mouvement de la matière et de l'énergie de la manière décrite par les équations du champ.

Toutefois, il y a un problème fondamental. Les équations de la relativité générale sont invariantes sous un grand nombre de transformations qui *mélangent* les coordonnées x_0, x_1, x_2 et x_3. Par exemple, la transformation du point d'observation

$$\begin{aligned} x'_0 &= x_0 + x_1 \\ x'_1 &= -x_0 + x_1 \\ x'_2 &= x_2 \\ x'_3 &= x_3 \end{aligned} \tag{286}$$

est permise en relativité générale, et laisse les équations du champ invariantes. Vous devriez pouvoir rechercher d'autres exemples.

Défi 373 pe

Cela entraîne une conséquence qui est, clairement, en contradiction flagrante avec la vie courante : l'invariance par difféomorphisme fait qu'il est *impossible* de distinguer l'espace du temps *dans le cadre* de la relativité générale. Plus explicitement, la coordonnée x_0 ne peut pas être uniquement identifiée au temps physique t, comme nous l'avons fait implicitement jusqu'à présent. Cette identification n'est possible qu'en relativité *restreinte*. Dans celle-ci, l'invariance sous la transformation de Lorentz (ou de Poincaré) de l'espace et du temps différencie l'énergie, la quantité de mouvement et le moment cinétique comme étant les observables fondamentales. En relativité générale, il n'y a *pas* de groupe d'isométrie pour une métrique (non triviale). Par conséquent, il n'y a *pas* d'observables physiques élémentaires, distinguées par leur particularité d'être conservées. Mais des quantités invariantes sont nécessaires pour les échanges d'informations !

* « Épargnez le temps. » Lucius Annaeus Seneca (v. 4 av. J.-C.–65), *Lettres à Lucilius* (*Epistulae morales ad Lucilium*) 88, 39.

En fait, nous pouvons nous *comprendre* les uns les autres uniquement parce que nous vivons dans un espace-temps approximativement *plat* : si la somme des angles d'un triangle n'était pas égale à π (deux angles droits), il n'y aurait *aucune* quantité invariante et nous n'aurions pas la propension naturelle à communiquer entre nous.

Comment avons-nous réussi à éluder habilement ce problème jusqu'à présent ? Nous l'avons fait de plusieurs manières. Le plus simple était d'exiger constamment que, dans une certaine région de la situation considérée, l'espace-temps fût notre espace-temps plat de Minkowski, où x_0 peut être assimilé à t. Nous pouvons remplir cette exigence soit à l'infini, comme nous l'avons fait autour des masses sphériques, soit par une approximation d'ordre zéro, comme nous l'avons fait pour les calculs du rayonnement gravitationnel et de toutes les autres perturbations. De cette manière, nous éliminons l'enchevêtrement délibéré des coordonnées, et les quantités invariantes autrement manquantes apparaissent comme prévu. Cette approche pragmatique constitue l'issue ordinaire de ce problème. En fait, elle est employée dans quelques textes, par ailleurs excellents, sur la relativité générale, qui évitent toute interrogation plus profonde concernant ce problème.

Réf. 191

Une variante commune de ce tour de passe-passe consiste à laisser cette distinction « poindre subrepticement » dans les calculs par l'introduction de la matière et de ses propriétés, ou par l'introduction du rayonnement. Les propriétés matérielles de la matière, par exemple ses équations d'état thermodynamiques, font toujours la distinction entre l'espace et le temps. Le rayonnement en fait de même, par sa propagation. Évidemment cela reste vrai uniquement pour les combinaisons particulières de la matière et du rayonnement que l'on nomme horloges et mètres étalons. En fait, cette méthode d'introduction de la matière est identique à la méthode d'introduction de l'espace-temps de Minkowski, si nous l'analysons minutieusement : les propriétés de la matière sont toujours définies en utilisant des descriptions de l'espace-temps de la relativité restreinte*.

Une autre variante de cette approche pragmatique consiste à utiliser la coordonnée de temps cosmologique. Un Univers isotrope et homogène doit avoir une coordonnée temporelle privilégiée, à savoir celle employée dans toutes les chronologies sur le passé et le futur de l'Univers. Cette méthode est en fait une combinaison des deux précédentes.

Page 210, page 154

Mais ici nous sommes dans une situation particulière. Nous voulons *comprendre* le mouvement dans ses principes, et pas seulement le calculer en pratique. Nous voulons une réponse *fondamentale*, non une pragmatique. Et pour cela nous avons besoin de savoir comment les positions x_i et le temps t sont reliés, et comment nous pouvons définir des quantités invariantes. Cette question nous prépare également à la lourde tâche d'allier la gravité et la théorie quantique, ce qui sera l'objectif de la dernière partie de notre ascension de la Montagne Mouvement.

Une solution fondamentale nécessite une description des horloges associées au système considéré, et une déduction sur la manière dont la lecture du temps t d'une horloge est reliée au comportement de ce système dans l'espace-temps. Mais nous savons que toute description d'un système requiert des mesures, par exemple afin de déterminer les états initiaux. Et des états initiaux réclament l'espace et le temps. Nous entrons donc dans un cercle vicieux : c'est précisément ce que nous voulions éviter au premier

* Nous remarquons quelque chose de stupéfiant ici : l'introduction d'une certaine condition aux petites distances (la matière) possède le même effet que l'introduction d'une certaine condition à l'infini. Est-ce juste une coïncidence ? Nous reviendrons sur ce problème dans la dernière partie de notre aventure.

Défi 374 pe
Page ??

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

abord.

Nos soupçons s'éveillent. Y a-t-il en réalité une distinction essentielle entre l'espace et le temps ? Faisons une petite excursion sur les diverses manières d'aborder cette question.

L'ESPACE ET LE TEMPS PEUVENT-ILS ÊTRE MESURÉS ?

Afin d'établir une distinction entre l'espace et le temps en relativité générale, nous devons être capables de les quantifier. Mais déjà dans la section sur la gravitation univer-
Page 287 selle, nous avons mentionné l'impossibilité de mesurer des longueurs, des durées et des masses seulement à l'aide des effets gravitationnels. Cette situation change-t-elle avec la relativité générale ? Les longueurs et durées sont liées par la vitesse de la lumière, et de surcroît les longueurs et les masses sont liées par la constante gravitationnelle. Malgré cette corrélation supplémentaire, il faut peu de temps pour se convaincre que le problème demeure.

En fait, nous avons besoin de l'*électrodynamique* pour le résoudre. C'est seulement en utilisant la charge élémentaire e que nous pouvons former des échelles de longueur,
Réf. 236 dont la plus simple est

$$l_{\text{échelle-em}} = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0}} \frac{\sqrt{G}}{c^2} \approx 1{,}4 \cdot 10^{-36}\,\text{m} \,. \tag{287}$$

Page 23 Ici, ε_0 représente la permittivité du vide. Alternativement, nous pouvons argumenter que la *mécanique quantique* fournit une échelle de longueur, puisque nous pouvons utiliser le quantum d'action $\hbar$ pour définir l'échelle de longueur

$$l_{\text{échelle-qt}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-35}\,\text{m} \,, \tag{288}$$

qui est appelée *longueur de Planck* ou *unité de longueur naturelle de Planck*. Toutefois, cela ne change pas l'argumentation, car nous avons besoin de l'électrodynamique pour mesurer la valeur de $\hbar$. L'équivalence entre ces deux arguments est mise en évidence en réécrivant la charge élémentaire e comme une combinaison de constantes fondamentales de la nature :

$$e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar\alpha} \,. \tag{289}$$

Ici, $\alpha \approx 1/137{,}06$ est la constante de structure fine qui caractérise la force d'interaction de l'électromagnétisme. En fonction de α, l'expression (287) devient

$$l_{\text{échelle}} = \sqrt{\frac{\alpha\hbar G}{c^3}} = \sqrt{\alpha}\, l_{\text{Pl}} \,. \tag{290}$$

En résumé, chaque mesure de longueur est fondée sur la constante de couplage électromagnétique α et sur la longueur de Planck. Bien entendu, la même chose est vraie pour
Défi 375 e les mesures de durées et de masses. Il n'existe donc aucune manière de définir ou de me-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

surer des longueurs, des durées et des masses en utilisant uniquement la gravitation ou la relativité générale*.

Étant donné ce résultat qui nous ramène à la raison, nous pouvons nous demander si l'espace et le temps sont véritablement nécessaires dans la relativité générale.

L'ESPACE ET LE TEMPS SONT-ILS INDISPENSABLES ?

Réf. 238 Robert Geroch répondit à cette question dans un magnifique article de cinq pages. Il explique comment formuler la théorie de la relativité générale sans faire usage de l'espace et du temps, en prenant comme point de départ uniquement les observables physiques.

Il commence avec l'ensemble de toutes les observables. Parmi elles, il y en a une, notée v, qui se distingue. C'est la seule observable qui nous permette de dire que pour deux observables a_1, a_2 quelconques il en existe une troisième a_3, telle que

$$(a_3 - v) = (a_1 - v) + (a_2 - v) \,. \tag{291}$$

Une telle observable est appelée le *vide*. Geroch montre comment tirer profit de celle-ci pour construire les dérivées des observables. Ce que nous appelons l'algèbre d'Einstein peut alors être construire, laquelle inclut la relativité générale tout entière.

Généralement, nous décrivons le mouvement en déduisant l'espace-temps des observables matérielles, en calculant l'évolution de l'espace-temps, et ensuite en inférant le mouvement de la matière qui découle de celui-ci. La description de Geroch montre que l'étape intermédiaire, c'est-à-dire l'utilisation de l'espace et du temps, n'est pas nécessaire.

De manière indirecte, le principe de la force maximale sous-tend la même idée. La relativité générale peut être dérivée de l'existence de valeurs limites pour la force ou la puissance. L'espace et le temps sont les seuls outils nécessaires pour traduire ce principe en conséquences tangibles pour des observateurs de la vie réelle.

Ainsi, il est possible de formuler la relativité générale sans faire usage de l'espace et du temps. Puisqu'ils ne sont pas indispensables, il semble improbable qu'il doive y avoir une différence fondamentale entre eux. Pourtant, une telle différence est notoire.

LES COURBES FERMÉES DE GENRE TEMPS EXISTENT-ELLES ?

Est-il possible que la coordonnée temporelle se comporte, du moins dans certaines régions, comme un tore ? Lorsque nous marchons, nous pouvons retourner au point de départ. Est-il possible de revenir dans le temps à l'endroit d'où nous sommes partis ? Cette question a été étudiée avec beaucoup de soin. Le texte de référence sur le sujet est
Réf. 197 celui de Hawking et Ellis, qui ont énuméré les propriétés requises de l'espace-temps, expliquant lesquelles sont mutuellement compatibles ou non. Ils ont trouvé, par exemple, que les espaces-temps qui sont uniformes, globalement hyperboliques, orientés, et dont le temps est orienté ne contiennent aucune courbe de cette espèce. Nous supposons généralement que l'Univers observé possède ces propriétés ; ainsi l'observation de courbes

Réf. 237 * Par le passé, John Wheeler avait l'habitude d'affirmer que son *horloge géométrodynamique*, un dispositif qui mesure le temps en faisant rebondir sans cesse une impulsion lumineuse entre deux miroirs parallèles,
Défi 376 s était un contre-exemple. Cependant ce n'est pas exact. Pouvez-vous le confirmer ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

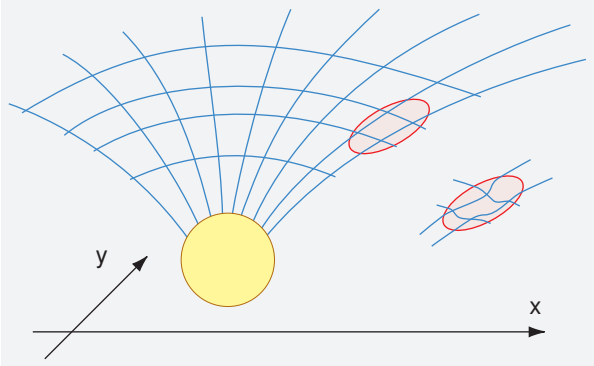


FIGURE 95 Un « trou » dans l'espace.

fermées de genre temps est improbable. En réalité, aucun indice n'a été relevé jusqu'à présent. Plus tard, nous montrerons que la recherche de telles courbes à l'échelle microscopique n'est pas parvenue, elle non plus, à en découvrir une.

Page ??

L'impossible existence des courbes fermées de genre temps semble souligner une démarcation possible entre l'espace et le temps. Mais en fait, cette différence n'est qu'apparente. Tous ces examens sont fondés sur le comportement de la matière. Et ces arguments tablent sans ambages sur une distinction explicite entre l'espace et le temps dès le départ. En bref, cette discussion ne peut pas nous permettre de savoir si l'espace et le temps diffèrent. Analysons ce problème d'une autre manière.

La relativité générale est-elle locale ? – L'argument du trou

Lorsqu'Albert Einstein développa la relativité générale, il eut du fil à retordre avec l'invariance par difféomorphisme. Sa préoccupation la plus retentissante fut son fameux *argument du trou*, que nous pourrions dénommer de façon plus adéquate le *paradoxe du trou*. Prenez la situation indiquée sur la Figure 95, dans laquelle une masse déforme l'espace-temps autour d'elle. Einstein imagina une petite région du vide, le *trou*, qui est schématisée par une petite ellipse. Qu'est-ce qui se passe si nous modifions d'une manière ou d'une autre la courbure à l'intérieur du trou tout en laissant la situation extérieure à celui-ci intacte, comme indiqué dans le croquis annexé à la figure ?

Réf. 239

D'une part, la nouvelle situation est, manifestement, physiquement distincte de la première, puisque la courbure à l'intérieur du trou est différente. Cette différence implique donc que la courbure à l'extérieur d'une région ne détermine pas la courbure à l'intérieur de celle-ci. Cela est profondément frustrant. Pis, si nous généralisons cette opération au domaine du temps, nous obtenons apparemment le pire cauchemar qui soit en physique : la disparition du déterminisme.

D'autre part, la relativité générale est invariante par difféomorphisme. La déformation indiquée sur la figure est un difféomorphisme, donc la nouvelle situation doit être physiquement équivalente à la situation d'origine.

Lequel de ces arguments est-il correct ? Einstein privilégia d'abord la première thèse, et par conséquent abandonna entièrement l'idée de l'invariance par difféomorphisme durant environ un an. Ce n'est qu'après qu'il réalisa que la deuxième hypothèse est correcte et que la première affirmation commet une erreur fondamentale : elle présume que

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

les axes de coordonnées x et y existent indépendamment l'un de l'autre, comme indiqué sur la figure. Mais, au cours de cette déformation, les coordonnées x et y changent mécaniquement aussi, de telle sorte qu'il n'existe *aucune* différence physique entre ces deux situations.

La morale de cette histoire est qu'*il n'y a aucune différence entre l'espace-temps et le champ gravitationnel*. L'espace-temps est un apanage du champ, comme le faisait remarquer Einstein, et non une entité dotée d'une réalité séparée, comme le suggère le graphique. Les coordonnées n'ont aucune signification physique, seules les distances (intervalles) dans l'espace et le temps en ont une. En particulier, l'invariance par difféomorphisme démontre que *le temps ne s'écoule pas*. Le temps, comme l'espace, est seulement une entité relationnelle : le temps et l'espace sont relatifs, ils ne sont pas absolus.

La relativité de l'espace et du temps possède des conséquences pratiques. Par exemple, il apparaît que de nombreux problèmes en relativité générale sont équivalents à la situation de Schwarzschild, bien qu'ils en paraissent totalement différents à première vue. Par conséquent, des chercheurs ont « redécouvert » la solution de Schwarzschild (bien entendu avec des systèmes de coordonnées différents) plus de vingt fois, pensant toujours qu'ils avaient découvert une nouvelle solution encore inconnue. Nous allons maintenant discuter d'une conséquence bouleversante de cette nouvelle perspective.

La Terre est-elle creuse ?

L'*hypothèse de la Terre creuse*, c'est-à-dire la conjecture qui stipule que nous vivons *à l'intérieur* d'une sphère, était populaire dans les cercles paranormaux autour de l'an 1900, et le demeure aujourd'hui chez certaines personnalités excentriques, surtout en Grande-Bretagne, en Allemagne et aux États-Unis. Ils soutiennent, comme illustré sur la Figure 96, que la Terre solide *enveloppe* le ciel, y compris la Lune, le Soleil et les étoiles. La plupart d'entre nous sommes bernés par l'enseignement, qui donne une autre description, parce que nous sommes élevés pour croire que la lumière voyage en ligne droite. Débarrassez-vous de cette croyance erronée, disent-ils, et la Terre creuse apparaît dans toute sa splendeur.

Page 48

Il est intéressant de noter que ce raisonnement est correct. Il n'existe *aucune manière* de réfuter cette classe de descriptions de l'Univers. En fait, comme le grand physicien autrichien Roman Sexl avait l'habitude de le dire, l'invariance par difféomorphisme de la relativité générale déclare même que ces deux points de vue sont équivalents entre eux. Le côté comique de cette histoire commence lorsque l'un des deux camps veut faire comprendre à l'autre que *seule* sa propre description peut être correcte. Vous pourriez vérifier que n'importe quelle argumentation de ce type est fausse, et il est amusant de se glisser dans la peau d'une telle personnalité fantasque et de défendre l'hypothèse de la Terre creuse contre vos amis. On explique facilement ainsi l'apparition du jour et de la nuit, l'horizon, et les images satellite de la Terre. Il est facile d'expliquer ce qui s'est passé au cours du voyage des premiers hommes vers la Lune. Ce faisant, vous pouvez rendre un grand nombre de physiciens novices complètement fous. La description usuelle et la description de la Terre creuse sont totalement équivalentes. Pouvez-vous confirmer que même la théorie quantique, avec son introduction d'échelles de longueur dans la nature, laisse cette situation invariablement identique ?

Réf. 240

Défi 377 e

Défi 378 s

De telles investigations montrent que l'invariance par difféomorphisme n'est pas une

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 96 Une modélisation de la théorie de la Terre creuse. (© Helmut Diehl)

symétrie facile à digérer. Mais il est dorénavant préférable de s'y habituer, car le reste de notre aventure nous dévoilera encore plus de surprises. En réalité, dans la dernière partie de notre excursion, nous découvrirons qu'il existe une symétrie de la nature encore plus générale, qui est analogue au changement de point de vue entre l'idée de la Terre creuse et la vision standard. Cette symétrie, la dualité de l'espace-temps, est valable non seulement pour des distances mesurées depuis le centre de la Terre, mais aussi pour des distances mesurées depuis un point quelconque dans la nature.

Page ??

L'ESPACE, LE TEMPS ET LA MASSE SONT-ILS INDÉPENDANTS ?

Nous pouvons conclure de cette brève discussion qu'il n'existe aucune distinction essentielle entre l'espace et le temps en relativité générale. Des distinctions pragmatiques, faisant usage de la matière, du rayonnement ou de l'espace-temps situé à l'infini, sont les seules possibles.

Dans la dernière partie de notre aventure, nous découvrirons que même l'introduction de la théorie quantique est cohérente avec cette vision. Nous montrerons explicitement qu'aucune distinction n'est possible en principe. Nous comprendrons que la masse et l'espace-temps sont sur un pied d'égalité, et que, dans un certain sens, les particules et le vide sont constitués de la même substance. Des distinctions entre l'espace et le temps se révèlent possibles uniquement aux basses énergies de la vie courante.

Page ??

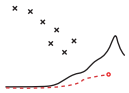
Page 168

Au commencement de notre ascension montagneuse, nous avons découvert que nous avions besoin de la matière pour définir l'espace et le temps. Maintenant, nous avons trouvé que nous avons même besoin de la matière pour *discerner* l'espace du temps. De manière analogue, au départ nous avions établi que l'espace et le temps sont nécessaires pour définir la matière ; maintenant nous avons deviné que même l'espace-temps *plat* est nécessaire pour la définir.

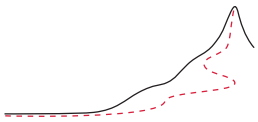
Page 190

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

En résumé, la relativité générale ne fournit pas une issue au raisonnement récursif que nous avions dévoilé en physique galiléenne. En réalité, elle rend ce problème encore moins limpide qu'avant. Il est vraiment digne d'intérêt de poursuivre notre escalade montagneuse.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 8

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE EN DIX POINTS – UN RÉSUMÉ POUR LE PROFANE

« Sapientia felicitas*. »

La relativité générale est l'ultime description des *trajectoires du mouvement* ou, si nous préférons, du *mouvement macroscopique*. Elle décrit comment les observations du mouvement faites par deux observateurs *quelconques* sont reliées l'une à l'autre. Elle décrit également le mouvement causé par la gravitation. En fait, la relativité générale est fondée sur les observations suivantes :

— Tous les observateurs s'accordent sur le fait qu'il existe une vitesse « parfaite » dans la nature, à savoir une vitesse énergétique maximale commune pour la matière. Cette vitesse est atteinte par le rayonnement sans masse, tels la lumière et les signaux radio.
— Tous les observateurs s'accordent sur le fait qu'il existe une force « parfaite » dans la nature, une force maximale commune qui peut être réalisée ou mesurée par des observateurs réalistes. Cette force se manifeste sur des horizons des événements.

Ces deux propositions contiennent toute la théorie de la relativité. À partir d'elles nous en déduisons que :

— L'espace-temps est composé d'événements situés dans 3 + 1 *dimensions continues*, ayant une courbure variable. La courbure peut être retrouvée à partir des mesures de distance entre les événements ou à partir des forces de marée. Nous vivons donc dans un espace-temps pseudo-riemannien. Les durées, les longueurs et les courbures mesurées varient d'un observateur à l'autre.
— L'espace-temps et l'espace sont *courbés à proximité de la masse et de l'énergie*. La courbure en un point est déterminée par la densité d'énergie–impulsion en ce point, et est décrite par les équations du champ. Lorsque la matière et l'énergie se déplacent, la courbure spatiale se déplace dans la même direction. Un retard inhérent dans ce mouvement rend impossible le transport d'énergie plus rapide que la lumière. La constante de proportionnalité entre l'énergie et la courbure est si petite que cette courbure n'est pas observée dans la vie quotidienne ; seule sa manifestation indirecte, à savoir la gravitation, est observée.
— L'espace est également *flexible* : il tend à être plat. Étant élastique, il peut osciller indépendamment de la matière, nous parlons alors de rayonnement gravitationnel ou d'ondes gravitationnelles.

* « La raison est le comble du bonheur. » Une célèbre inscription de l'université d'Oxford.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

— La matière en chute libre se déplace le long de *géodésiques*, c'est-à-dire le long de trajectoires de longueur maximale dans l'espace-temps courbe. Dans l'espace, cela signifie que la lumière est déviée, lorsqu'elle passe près des grosses masses, du double de la grandeur prévue par la gravitation universelle.
— Pour décrire la gravitation, nous *avons besoin* de l'espace-temps courbe, c'est-à-dire de la relativité générale, pour le moins *en dernier recours* à chaque fois que les distances sont de l'ordre du rayon de Schwarzschild $r_S = 2Gm/c^2$. Lorsque les distances sont beaucoup plus importantes que cette grandeur, la description relativiste de la gravité et du gravitomagnétisme (entraînement de référentiel) est suffisante. Lorsque les distances sont encore plus grandes, la description par la gravitation universelle, à savoir $a = Gm/r^2$, associée à l'espace-temps plat de Minkowski, est convenable en première approximation.
— L'espace et le temps ne sont pas discernables de façon globale, mais seulement de façon locale. La *matière* est requise pour faire cette distinction.

De surcroît, toute la matière et l'énergie que nous observons dans le ciel nous conduisent aux conclusions qui suivent :

— À l'échelle cosmologique, tout objet s'éloigne des autres : l'Univers est en *expansion*. Cette expansion de l'espace-temps est décrite par les équations du champ.
— L'Univers possède un *âge fini*, c'est l'explication de l'obscurité du ciel nocturne. Un horizon restreint les intervalles d'espace-temps mesurables à environ quatorze milliards d'années.

La précision de cette description

La relativité générale est-elle à la hauteur des efforts consentis ? Il est plus commode de partager la discussion concernant son exactitude en deux ensembles d'expériences. Le premier ensemble est constitué des mesures sur la manière dont la *matière se déplace*. Les objets suivent-ils réellement des géodésiques ? Comme résumé dans le Tableau 7, toutes les expériences s'accordent avec la théorie aux erreurs de mesures près, c'est-à-dire à moins d'une partie pour 10^{12}. En bref, la façon dont la matière chute est effectivement bien décrite par la relativité générale.

Réf. 241

Réf. 242

Le second ensemble de mesures concerne la dynamique de l'espace-temps lui-même. L'*espace-temps s'agite-t-il* en respectant les équations du champ de la relativité générale ? Autrement dit, l'espace-temps est-il réellement courbé par la matière de la façon prédite par la théorie ? Un grand nombre d'expériences ont été réalisées, près et loin de la Terre, à la fois dans des champs faibles et forts. Toutes s'accordent avec les prédictions aux erreurs de mesure près. Cependant, les meilleurs relevés réalisés jusqu'à présent ne possèdent environ que 3 chiffres significatifs. Remarquez que, bien que de nombreuses expériences aient été exécutées, il n'existe que quelques *types* de tests, comme le Tableau 7 l'indique. La découverte d'un nouveau type d'expériences garantit pratiquement d'avance notoriété et prospérité à son inventeur. Ce qui est le plus recherché, bien entendu, c'est la détection directe des ondes gravitationnelles.

Réf. 241, Réf. 242

Défi 379 pe

Un autre commentaire sur le Tableau 7 concerne l'ordre de grandeur. Après plusieurs décennies au cours desquelles tous les effets mesurés étaient seulement de l'ordre de v^2/c^2, plusieurs *effets en champs forts* dans des pulsars nous ont permis d'atteindre

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 7 Types de tests de la relativité générale.

EFFET MESURÉ	CONFIRMATION	TYPE	RÉFÉRENCE
Principe d'équivalence	10^{-12}	mouvement de la matière	Réf. 123, Réf. 241, Réf. 243
Dépendance en $1/r^2$ (nombre de dimensions de l'espace-temps)	10^{-10}	mouvement de la matière	Réf. 244
Indépendance de G par rapport au temps	10^{-19} /s	mouvement de la matière	Réf. 241
Décalage vers le rouge (lumière et micro-ondes sur le Soleil, la Terre, Sirius)	10^{-4}	courbure spatio-temporelle	Réf. 101, Réf. 100, Réf. 241
Avancée du périhélie (quatre planètes, Icare, pulsars)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle	Réf. 241
Déviation de la lumière (lumière, ondes radio frôlant le Soleil, les étoiles, les galaxies)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle	Réf. 241
Décalage temporel (signaux radio près du Soleil, près des pulsars)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle	Réf. 241, Réf. 130
Gravitomagnétisme (Terre, pulsar)	10^{-1}	courbure spatio-temporelle	Réf. 125
Effet géodésique (Lune, pulsars)	10^{-1}	courbure spatio-temporelle	Réf. 146, Réf. 241
Émission décalée d'ondes gravitationnelles (pulsars)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle	Réf. 241

Réf. 241 l'ordre v^4/c^4. Quelques effets de cet ordre de grandeur devraient bientôt être également découverts à l'intérieur même du Système solaire, en utilisant des expériences satellitaires de haute précision. Actuellement, le trophée de toutes les mesures revient au délai de l'émission des ondes gravitationnelles, c'est le seul effet en v^5/c^5 mesuré jusqu'à présent.

Page 160

La difficulté de parvenir à une haute précision dans les mesures de la courbure de l'espace-temps représente la raison pour laquelle la masse est évaluée à l'aide de balances, en utilisant toujours (de manière indirecte) le prototype du kilogramme situé à Paris, au lieu de définir une certaine courbure étalon et de fixer la valeur de G. En réalité, aucune expérience utile sur la courbure engendrée par la Terre n'a été réalisée jusqu'à maintenant. Une percée dans ce domaine ferait sensation. Les méthodes de courbure terrestre actuellement disponibles ne pourraient même pas nous permettre de définir un kilogramme d'or ou d'oranges avec une précision d'un kilogramme seulement !

Un autre procédé pour tester la relativité générale consiste à rechercher des descriptions alternatives de la gravitation. Il existe un nombre assez important d'autres théories
Réf. 242, Réf. 245 de la gravitation qui ont été formulées et étudiées, mais jusqu'à présent seule la relativité générale est en accord avec toutes les expériences.

En résumé, comme Thibault Damour aime l'expliquer, la relativité générale est exacte

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à au moins 99,999 999 999 9 % à propos de la description du mouvement de la matière et de l'énergie, et exacte à au moins 99,9 % concernant la façon dont la matière et l'énergie
Réf. 241 courbent et déplacent l'espace-temps. Nous ne connaissons aucune exception, aucune anti-gravité et aucune donnée expérimentale inexpliquée. Tout mouvement se produisant sur Terre et dans les cieux est décrit par la relativité générale. La réussite d'Albert Einstein ne peut être mise en défaut.

Nous remarquons que la relativité générale n'a pas été testée pour le *mouvement microscopique*. Dans ce contexte, le mouvement microscopique concerne tout mouvement pour lequel l'action se rapproche du quantum d'action, à savoir 10^{-34} Js. Ce problème constitue la partie centrale de la dernière étape de notre aventure.

Recherches en relativité générale et en cosmologie

Réf. 246 La recherche en relativité générale n'a jamais été aussi intense*.

* *

Les études expérimentales les plus intéressantes en ce moment sont celles qui sont consacrées aux pulsars binaires, à la quête des ondes gravitationnelles et aux divers satellites dédiés à cette observation. Entre autres, un satellite spécifique détectera tous les pulsars possibles de la Galaxie. Toutes ces expériences permettront de réaliser des tests expérimentaux dans des domaines qui sont demeurés inaccessibles jusqu'à présent.

* *

La description des collisions et des problèmes à plusieurs corps, impliquant des étoiles, des étoiles à neutrons et des trous noirs, aide les astrophysiciens à améliorer leur compré-
Réf. 247 hension de la profusion des phénomènes qu'ils observent dans leurs télescopes.

* *

L'étude de l'Univers primordial et des propriétés des particules élémentaires, ainsi que des phénomènes tels que l'*inflation*, une courte période d'expansion accélérée qui eut lieu au cours des toutes premières secondes, représente toujours un important sujet de
Réf. 248 recherches.

* *

L'approfondissement du chaos présent dans les équations du champ est d'un intérêt fondamental dans l'étude de l'Univers primordial, et peut être rattaché au problème de la
Réf. 249 formation des premières galaxies, une des plus grandes questions ouvertes en physique.

* *

Le recueil de données concernant la formation des galaxies représente le principal objectif de plusieurs systèmes de satellites et de télescopes construits dans ce but. Ceux-ci se focalisent principalement sur la quête d'anisotropies localisées du fond diffus cosmolo-
Réf. 250 gique micro-onde dues aux galaxies primordiales.

* Il existe même une excellente revue gratuite de la recherche disponible sur Internet, appelée *Living Reviews in Relativity*, qui peut être compulsée sur le site www.livingreviews.org.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

La détermination des paramètres cosmologiques tels que la densité de matière, la cour-
Réf. 193 bure et la densité du vide constitue un effort primordial de l'astrophysique moderne.

* *

Des astrophysiciens découvrent régulièrement de nouveaux phénomènes dans les cieux. Par exemple, les divers types de sursauts gamma, de bouffées de rayons X et de sursauts
Réf. 251 optiques ne sont pas encore parfaitement compris. Des sursauts gamma, par exemple, peuvent être aussi brillants que 10^{17} étoiles du gabarit du Soleil réunies. Cependant, ils ne durent que quelques secondes. Nous fournirons plus loin plus de détails sur cette
Page ?? recherche.

* *

Une base de données informatisée de toutes les solutions des équations du champ est en train d'être alimentée. Les chercheurs vérifient entre autres si elles sont toutes vraiment
Réf. 252 différentes les unes des autres.

* *

Des solutions dotées de topologies non triviales, tels les trous de ver et les solutions de type particule, constituent un domaine captivant de recherche, associé à la théorie des
Réf. 254 cordes.

* *

D'autres formulations de la relativité générale, qui décrivent l'espace-temps avec des quantités différentes de la métrique, sont continuellement en cours de développement, dans l'espoir d'éclaircir ses relations avec le monde quantique. Un exemple moderne
Réf. 255 d'une telle description se trouve dans ce que nous appelons les variables d'Ashtekar.

* *

L'unification de la physique quantique et de la relativité générale, qui est le thème de la dernière partie de cette ascension montagneuse, absorbera les chercheurs pendant un
Réf. 256 grand nombre d'années encore.

* *

Finalement, l'enseignement de la relativité générale, qui est restée cloîtrée pendant plusieurs décennies derrière des indices grecs, des formes différentielles et d'autres méthodes antipédagogiques, bénéficiera grandement des améliorations futures qui se foca-
Réf. 257 lisent plus sur la physique sous-jacente et moins sur le formalisme utilisé.

En bref, la relativité générale forme toujours un domaine de recherche extrêmement intéressant, et des découvertes importantes sont toujours attendues.

Se pourrait-il que la relativité générale soit différente ?

La constante de la gravitation fournit une limite pour la densité et l'accélération des objets, ainsi que pour la puissance dégagée par les machines. Nous avons fondé toutes nos

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

déductions sur son invariance. Est-il possible que la constante gravitationnelle G varie d'un endroit à l'autre ou au cours du temps ? Cette question est subtile. À première vue, la réponse est un franc : « Oui, bien sûr ! Regardez simplement ce qui se passe lorsque la valeur de G est modifiée dans les formules. » Cependant, cette réponse est fausse, de même qu'elle était fausse pour la vitesse de la lumière c.

Page 90

Puisque la constante de la gravitation entre dans notre définition de la gravité et de l'accélération, et donc, même si nous ne le remarquons pas, dans la construction de tous les étalons de référence, de tous les standards de mesure et de tous les dispositifs de mesure, il n'existe *aucun procédé* permettant de détecter si sa valeur varie réellement. Aucune expérience imaginable ne pourrait détecter une quelconque variation. Chaque évaluation de la force est, que nous le voulions ou non, basée sur une comparaison avec la force limite. Il n'y a aucun procédé permettant, en principe, de contrôler l'invariance d'un étalon. Cela est encore plus surprenant parce que des mesures de cette espèce sont régulièrement rapportées, comme dans le Tableau 7. Mais le résultat de n'importe quelle expérience de ce type se prévoit facilement : aucun changement ne sera jamais détecté.

Défi 380 pe

Page 268

Le nombre de dimensions spatiales pourrait-il être différent de 3 ? Cette question est plutôt compliquée. Par exemple, trois est le plus petit nombre de dimensions pour lequel un tenseur de Ricci nul est compatible avec une courbure non nulle. D'un autre côté, des dimensions supérieures à trois entraînent des déviations par rapport à la « loi » en l'inverse du carré de la gravitation. Jusqu'à présent, il n'existe aucun indice allant dans ce sens.

Les équations de la relativité générale pourraient-elles être différentes ? Les théoriciens ont exploré plusieurs théories alternatives, telles que les théories tenseur–scalaire, les théories avec torsion, ou les théories qui brisent l'invariance de Lorentz. Cependant, aucune des théories alternatives proposées jusqu'à maintenant ne semble s'ajuster avec les données expérimentales. Toutefois, deux candidats pourraient subsister.

L'incorporation de la torsion dans les équations du champ, qui constitue une éventuelle extension de la théorie, représente une des tentatives les plus prometteuses permettant d'introduire le spin des particules dans la relativité générale. L'inclusion de la torsion dans la relativité générale ne requiert aucune nouvelle constante fondamentale. En réalité, l'absence de la torsion constituait une hypothèse de départ dans l'équation de Raychaudhuri. L'utilisation de l'équation de Raychaudhuri étendue, qui inclut la torsion, devrait nous permettre de déduire la théorie d'Einstein–Cartan tout entière à partir du principe de la force maximale. Ce sujet représente un terrain de recherches pour l'avenir.

Réf. 253

Réf. 258

Finalement, il y a un résultat expérimental qui demeure toujours inexpliqué. La vitesse de rotation de la matière située très loin du centre des galaxies ne semble pas être cohérente avec la dépendance en l'inverse du carré de la distance. Il pourrait y avoir plusieurs raisons qui expliquent cet effet. Les modèles les plus populaires sont, d'un côté, l'existence de la matière noire et, de l'autre côté, une modification dans les équations du champ pour les très grandes distances astronomiques. Le modèle de la matière noire suppose que nous rencontrons des difficultés pour observer quelque chose ; le modèle de la dynamique corrigée suppose que nous avons omis quelque chose dans les équations. Cette question est toujours ouverte.

Réf. 259

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les limites de la relativité générale

En dépit de ses nombreux succès, la description du mouvement présentée jusqu'à maintenant n'est pas satisfaisante. Peut-être avez-vous déjà eu quelques intuitions concernant certains problèmes non résolus.

Défi 381 e

En premier lieu, bien que la vitesse de la lumière soit le point de départ de toute la théorie, nous ne savons pas encore *ce qu'est* réellement la lumière. Ce sera notre prochain sujet de discussion.

Deuxièmement, nous avons vu que toutes les choses chutent en suivant des géodésiques. Mais une montagne ne chute pas. Dans un sens, la matière située en dessous l'empêche de tomber. Comment ? Et après tout, d'où vient la masse ? Qu'est-ce que la masse ? Qu'est-ce que la matière ? La relativité générale ne fournit aucune réponse ; en fait, elle *ne* décrit *pas du tout* la matière elle-même. Einstein avait l'habitude de dire que le membre de gauche des équations du champ, qui décrit la courbure de l'espace-temps, est le granite, alors que le membre de droite, qui décrit la matière, est le sable. En réalité, à ce niveau, nous ne savons toujours pas ce que sont la matière et la masse. Comme nous l'avons déjà souligné, pour transformer le sable en roche nous avons d'abord besoin de la théorie quantique, et ensuite, dans une étape ultérieure, de son unification avec la relativité. C'est le programme qui nous attend pour le reste de notre aventure.

Nous avons aussi vu que la matière est nécessaire pour distinguer clairement l'espace du temps, et surtout pour comprendre le fonctionnement des horloges, des mètres étalons et des balances. En particulier, une question demeure : *après tout* pourquoi y a-t-il des unités de masse, de longueur et de temps dans la nature ? Cette question profonde sera également abordée dans le chapitre suivant.

Pour finir, nous en savons peu au sujet du vide. Nous avons besoin de comprendre l'origine de la grandeur constatée de la constante cosmologique et du nombre de dimensions d'espace-temps. Ce n'est qu'après cela que nous pourrons répondre à la question élémentaire : pourquoi le ciel est-il si éloigné ? La relativité générale ne nous est d'aucun secours ici. Pire, la petitesse de la constante cosmologique contredit la version la plus simple de la théorie quantique. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous avons encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'atteindre le sommet de la Montagne Mouvement.

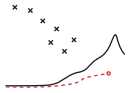
Page ??

En résumé, pour décrire correctement le mouvement, nous avons besoin d'une description plus précise de la lumière, de la matière et du vide. Autrement dit, nous avons besoin d'en savoir plus sur tout ce que nous savons déjà. Sinon, nous ne pouvons espérer trouver de réponse aux questions qui nous taraudent sur les montagnes, les horloges et les astres. Dans un sens, il semblerait que nous n'ayons pas accumulé beaucoup de connaissances. Par chance, ce n'est pas vrai. Nous en avons tant appris que, dans la prochaine étape, nous serons obligés de revenir en arrière, aux situations *sans* la gravité, c'est-à-dire de revenir au cadre de la relativité restreinte. C'est la prochaine section, intermédiaire, de notre ascension montagneuse. Malgré ce retour simplificateur à l'espace-temps plat, attendons-nous à y trouver beaucoup d'émerveillement.

Page ??

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

> C'est une bonne chose que nous ayons la gravité, sinon les oiseaux morts resteraient tout simplement en l'air. Les chasseurs seraient bien embarrassés.
>
> Steven Wright, acteur.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Annexe A

UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES

Mesurer consiste à comparer avec un étalon. Un étalon est basé sur une *unité*. Une multitude de systèmes d'unités différents ont été utilisés à travers le monde. La plupart des étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Une telle autorité peut être utilisée abusivement : c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même jadis. La solution est identique dans les deux situations : mettre sur pied un étalon indépendant et général. Au sujet des unités, cela eut lieu au dix-huitième siècle : pour éviter des abus de la part d'institutions autoritaires, pour évincer les problèmes dus aux unités de référence différentes, variables et non reproductibles, et – ce n'est pas une blague – pour simplifier le recouvrement des impôts, un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. On l'appelle le *Système International d'Unités*, *SI* en abrégé, et il est défini par un traité international, la « Convention du Mètre ». Les unités sont régies par un organisme international, la « Conférence Générale des Poids et Mesures », et ses organisations filles, la « Commission Internationale des Poids et Mesures » et le « Bureau International des Poids et Mesures » (BIPM), qui ont toutes vu le jour au même moment, juste avant la Révolution française.

Réf. 260

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*, dont les définitions officielles sont données ci-dessous, avec les dates de leurs formulations :

- « La *seconde* est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 kelvin. » (1967)*
- « Le *mètre* est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde. » (1983)
- « Le *kilogramme* est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. » (1901)*
- « L'*ampère* est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. » (1948)
- « Le *kelvin*, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. » (1967)*
- « La *mole* est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. » (1971)*
- « La *candela* est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. » (1979)*

Notez que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un modèle de référence du mouvement, à savoir la lumière. C'est une illustration supplémentaire qui souligne le fait que l'observation du mouvement, qui est le type fondamental de changement, est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. Par ailleurs, l'emploi de la lumière dans les définitions avait déjà été proposé en 1827 par Jacques Babinet*.

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités sont définies par multiplication et division. Ainsi, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes :

- Les unités du SI forment un système ayant *la précision de l'état de l'art* : toutes les unités sont définies avec une précision qui est supérieure à la précision des mesures couramment effectuées. De plus, la précision de ces définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle dans la définition de la seconde se situe autour de 10^{-14}, 10^{-10} environ pour le mètre, 10^{-9} environ pour le kilogramme, 10^{-7} pour l'ampère, moins de 10^{-6} pour la mole, 10^{-6} pour le kelvin et 10^{-3} pour la candela.
- Les unités du SI forment un système *absolu* : toutes les unités sont définies de telle manière qu'elles puissent être reproduites dans tout laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une précision élevée. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui détermine les étalons. (Le kilogramme, toujours défini à l'aide d'un artéfact, est la dernière exception à cette exigence, une recherche intensive est en cours pour éliminer cet objet de la définition – une compétition internationale qui prendra encore quelques années. Il existe deux approches : dénombrer des particules ou fixer $\hbar$. La première peut être accomplie dans des cristaux, la dernière en utilisant n'importe quelle formule où $\hbar$ apparaît, comme la formule de la longueur d'onde de de Broglie ou celle de l'effet Josephson.)
- Les unités du SI forment un système *pratique* : les unités de base sont des quantités dont la grandeur est familière. Les unités couramment employées possèdent des dénominations et des abréviations standard. La liste complète inclut les sept unités de base, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Les unités *supplémentaires* du SI sont les deux suivantes : l'unité de l'angle (plan), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon, est le *radian* (rad). Pour l'angle solide, défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon, l'unité est le *stéradian* (sr).

Les unités *dérivées* ayant un nom spécial, dans leur désignation officielle en français, c'est-à-dire sans lettre capitale et sans accent, sont :

* Les symboles respectifs sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Le prototype international du kilogramme est un cylindre en platine–iridium conservé au BIPM à Sèvres, en France. Pour obtenir plus de précisions sur les niveaux de l'atome de césium, consultez un livre sur la physique atomique. L'échelle Celsius d'une température θ est définie ainsi : $\theta/°C = T/K - 273,15$, remarquez le minuscule écart avec le nombre apparaissant dans la définition du kelvin. Le SI stipule également : « Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules ». Dans la définition de la mole, nous sous-entendons que les atomes du carbone 12 sont non liés, au repos et dans leur état fondamental. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555,5 nm, c'est-à-dire la couleur verte, qui est à peu près égale à la longueur d'onde où l'œil est le plus sensible.

Réf. 261

* Jacques Babinet (1794–1874) fut un physicien français qui publia des travaux importants en optique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nom	Symbole
hertz	$Hz = 1/s$
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/m\,s^2$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$
volt	$V = kg\,m^2/As^3$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/A^2s^3$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/As^2$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/A^2s^2$
lumen	$lm = cd\,sr$
becquerel	$Bq = 1/s$
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$

Nom	Symbole
newton	$N = kg\,m/s^2$
joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
coulomb	$C = As$
farad	$F = As/V = A^2s^4/kg\,m^2$
siemens	$S = 1/\Omega$
tesla	$T = Wb/m^2 = kg/As^2 = kg/Cs$
degré Celsius	°C (cf. définition du kelvin)
lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
katal	$kat = mol/s$

Nous remarquons que dans toutes les définitions de ces unités, le kilogramme n'apparaît qu'aux puissances 1, 0 et -1. L'explication finale de cette réalité n'est apparue que récemment. Pouvez-vous tenter d'en formuler la raison ? Défi 382 pe

Les unités *admises* non SI sont la *minute*, l'*heure*, le *jour* (pour le temps), le *degré* $1° = \pi/180$ rad, la *minute* $1' = \pi/10\,800$ rad, la *seconde* $1'' = \pi/648\,000$ rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. On doit éviter toutes les autres unités.

On rend plus pratiques toutes les unités du SI grâce à l'introduction de désignations et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que nous appelons les *préfixes** :

10^n	Nom	Symb.	10^n	Nom	Symb.
10^1	déca	da	10^{-1}	déci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	µ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	péta	P	10^{-15}	femto	f

10^n	Nom	Symb.	10^n	Nom	Symb.
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
non officiel :			Réf. 262		
10^{27}	xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{30}	wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{33}	vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
10^{36}	udekta	U	10^{-36}	udeko	u

* Certains de ces noms sont inventés (yocto qui se prononce de manière presque identique au latin *octo* « huit », zepto qui se prononce presque comme le mot latin *septem*, yotta et zetta qui leur ressemblent, exa et péta qui se prononcent comme les mots grecs ἑξάκις et πεντάκις pour « six fois » et « cinq fois », ceux qui ne sont pas officiels se prononcent comme les mots grecs désignant neuf, dix, onze et douze). Certains sont issus du danois/norvégien (atto pour *atten* « dix-huit », femto pour *femten* « quinze »), certains proviennent du latin (de *mille*, de *centum* « cent », de *decem* « dix », de *nanus* « nain »), certains sont tirés de l'italien (de *piccolo* « petit »), certains sont grecs (micro provient de μικρός « petit », déca/déka de δέκα « dix », hecto de ἑκατόν « cent », kilo de χίλιοι « mille », méga de μέγας « grand », giga de γίγας « géant », téra de τέρας « monstre »).

Interprétez : J'étais bloqué dans un tel embouteillage que j'ai mis un microsiècle pour faire un picoparsec et que ma consommation de carburant fut de deux dixièmes d'un millimètre carré. Défi 383 e

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

- Les unités du SI forment un système *exhaustif* : elles recouvrent de manière systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles fixent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.
- Les unités du SI forment un système *universel* : elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, dans l'industrie, dans le commerce, à la maison, dans l'enseignement et dans la recherche. Elles pourraient même être employées par des civilisations extraterrestres, si celles-ci existaient.
- Les unités du SI forment un système *cohérent* : le produit ou le quotient de deux unités du SI est aussi une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, « SI » par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne constituent pas l'unique ensemble possible qui puisse vérifier toutes ces conditions, mais elles sont le seul système existant qui le fait*.

Rappelez-vous que puisque chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, toute mesure exige de la matière pour réaliser l'étalon (oui, même pour la vitesse standard), et du rayonnement pour accomplir cette comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils peuvent être clairement dissociés l'un de l'autre.

Page ??

Unités naturelles de Planck

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens emploient souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations sous une forme simple. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont reliées. En physique microscopique, le système des *unités naturelles de Planck* est souvent utilisé. Il est défini en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont donc définies à partir de combinaisons de constantes fondamentales, celles qui correspondent aux unités de base du SI sont données dans le Tableau 39**. Ce tableau est également utile pour convertir des équations notées en unités naturelles aux unités du SI : substituez simplement chaque quantité X par X/X_{Pl}.

Défi 384 e

* La plupart des unités non SI qui sont toujours d'usage dans le monde sont d'origine romaine. Le mile provient de *milia passum*, qui était équivalent à mille (doubles) enjambées d'environ 1 480 mm chacune. Aujourd'hui un mile nautique, autrefois défini comme une minute d'arc à la surface de la Terre, vaut exactement 1 852 m. Le pouce vient de *uncia*/*onzia* (un douzième – d'un pied actuel). La livre (de l'anglais « pound » qui vient de *pondere* « peser ») est employée comme une traduction de *libra* – balance – qui est à l'origine de son abréviation lb. Même la coutume de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Celles-ci et les autres unités toutes aussi cocasses – comme le système dans lequel toutes les unités commencent avec un « f », et qui utilise le furlong/quinze jours comme unité de vitesse – sont dorénavant officiellement définies comme des multiples des unités du SI.

** Les unités naturelles x_{Pl} données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c'est-à-dire celles définies en utilisant la constante $\hbar$, et non, comme le fit à l'origine Planck, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités électromagnétiques peuvent aussi être définies à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\varepsilon_0$ dans les expressions : par exemple, en utilisant $4\pi\varepsilon_0\alpha$, avec la *constante de structure fine* α, on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour des explications sur les nombres situés entre parenthèses, les écarts types, lisez la page 286.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 9 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

NOM	DÉFINITION			VALEUR		
Unités de base						
Longueur de Planck	l_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1{,}616\,0(12)\cdot 10^{-35}$ m	
Durée de Planck	t_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^5}$	=	$5{,}390\,6(40)\cdot 10^{-44}$ s	
Masse de Planck	m_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c/G}$	=	$21{,}767(16)$ µg	
Courant de Planck	I_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	=	$3{,}479\,3(22)\cdot 10^{25}$ A	
Température de Planck	T_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	=	$1{,}417\,1(91)\cdot 10^{32}$ K	
Unités triviales						
Vitesse de Planck	v_{Pl}	=	c	=	0,3 Gm/s	
Moment cinétique de Planck	L_{Pl}	=	$\hbar$	=	$1{,}1\cdot 10^{-34}$ Js	
Quantum d'action de Planck	S_{aPl}	=	$\hbar$	=	$1{,}1\cdot 10^{-34}$ Js	
Entropie de Planck	S_{ePl}	=	k	=	13,8 yJ/K	
Unités dérivées						
Densité de Planck	ρ_{Pl}	=	$c^5/G^2\hbar$	=	$5{,}2\cdot 10^{96}$ kg/m^3	
Énergie de Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/G}$	=	$2{,}0$ GJ $= 1{,}2\cdot 10^{28}$ eV	
Quantité de mouvement de Planck	p_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^3/G}$	=	6,5 Ns	
Puissance de Planck	P_{Pl}	=	c^5/G	=	$3{,}6\cdot 10^{52}$ W	
Force de Planck	F_{Pl}	=	c^4/G	=	$1{,}2\cdot 10^{44}$ N	
Pression de Planck	p_{Pl}	=	$c^7/G\hbar$	=	$4{,}6\cdot 10^{113}$ Pa	
Accélération de Planck	a_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/\hbar G}$	=	$5{,}6\cdot 10^{51}$ m/s^2	
Fréquence de Planck	f_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/\hbar G}$	=	$1{,}9\cdot 10^{43}$ Hz	
Charge électrique de Planck	q_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	=	1,9 aC = 11,7 e	
Tension de Planck	U_{Pl}	=	$\sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	=	$1{,}0\cdot 10^{27}$ V	
Résistance de Planck	R_{Pl}	=	$1/4\pi\varepsilon_0 c$	=	30,0 Ω	
Capacité électrique de Planck	C_{Pl}	=	$4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1{,}8\cdot 10^{-45}$ F	
Inductance de Planck	L_{Pl}	=	$(1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	=	$1{,}6\cdot 10^{-42}$ H	
Champ électrique de Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	=	$6{,}5\cdot 10^{61}$ V/m	
Densité du flux magnétique de Planck	B_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	=	$2{,}2\cdot 10^{53}$ T	

Les unités naturelles sont importantes à un autre égard : à chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée d'« infiniment petite (ou grande) », l'expression correcte à considérer est « aussi petite (ou aussi grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante ». Comme on l'explique tout au long de ce texte, et particulièrement dans la Page ?? partie finale, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrémale pour l'observable correspondante – certaines une borne supérieure et d'autres une

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

limite inférieure. Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement déterminés. La valeur extrémale exacte pour chaque observable dans la nature est obtenue lorsque G est remplacé par $4G$, $\hbar$ par $\hbar/2$, k par $k/2$ et $4\pi\varepsilon_0$ par $8\pi\varepsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrémales, ou *unités de Planck corrigées*, sont les *véritables unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrémales, mais uniquement pour certaines quantités étendues. (Pouvez-vous deviner lesquelles ?)

Défi 385 s

Autres systèmes d'unités

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est l'évaluation des intensités de toutes les interactions. Par conséquent il n'est pas pratique de fixer la constante de la gravitation G à un, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies fixent souvent $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$*, laissant seulement la constante gravitationnelle G dans les équations.

Dans ce système, il n'y a qu'une seule unité fondamentale, mais son choix reste libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité de base, longueur qui est l'archétype d'une quantité mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont alors reliées par

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}]\,, \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T]\,, \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha]\,, \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned} \tag{292}$$

où nous avons noté $[x]$ l'unité de la quantité x. Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système**.

Souvent, afin d'avoir un aperçu des énergies nécessaires pour observer un effet en cours d'étude, on choisit une énergie de référence comme unité fondamentale. En physique des particules l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* (eV), défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une

* Des définitions différentes pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entres autres, au système d'unités gaussiennes souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités de Heaviside–Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

Réf. 263

** Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique et B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance, P la puissance, G la constante de la gravitation.

La page Web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités l'une vers l'autre.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_S = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer des masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la *même* dimension, et $\hbar$ possède la dimension d'une surface.

Réf. 264

Déjà au dix-neuvième siècle, George Stoney avait suggéré d'utiliser comme unités de longueur, de temps et de masse les quantités $l_S = \sqrt{Ge^2/(c^4 4\pi\varepsilon_0)} = 1{,}4 \cdot 10^{-36}$ m, $t_S = \sqrt{Ge^2/(c^6 4\pi\varepsilon_0)} = 4{,}6 \cdot 10^{-45}$ s et $m_S = \sqrt{e^2/(G4\pi\varepsilon_0)} = 1{,}9$ µg. Comment ces unités sont-elles reliées aux unités de Planck ?

Défi 386 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

différence de potentiel électrique de 1 volt (« protonvolt » serait une désignation plus appropriée). Ainsi nous avons $1\,\mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$, ou approximativement

$$1\,\mathrm{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\mathrm{aJ} \tag{293}$$

ce qui est facile à mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ donne $G = 6{,}9 \cdot 10^{-57}\,\mathrm{eV}^{-2}$ et nous permet aussi d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la distance, à l'aide des correspondances respectives
Défi 387 e $1\,\mathrm{eV} \equiv 1{,}8 \cdot 10^{-36}\,\mathrm{kg} \equiv 5{,}4 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{Ns} \equiv 242\,\mathrm{THz} \equiv 11{,}6\,\mathrm{kK}$ et $1\,\mathrm{eV}^{-1} \equiv 4{,}1\,\mathrm{fs} \equiv 1{,}2\,\mu\mathrm{m}$.

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations qui suivent sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20 °C ou 293 K, correspond à une énergie cinétique par particule de 0,025 eV ou 4,0 zJ. L'énergie la plus élevée d'une particule, mesurée jusqu'à présent, appartient à un rayon cosmique d'une énergie de
Réf. 265 $3 \cdot 10^{20}$ eV ou 48 J. Ici bas, sur la Terre, nous avons construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des anti-électrons, et un autre capable de produire une énergie de 10 TeV ou 1,6 µJ pour des protons sera bientôt achevé. Ils appartiennent tous les deux au CERN à Genève et possèdent une circonférence de 27 km.

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK, dans un système
Réf. 266 de noyaux de rhodium maintenus par un procédé de refroidissement particulier. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est également la plus petite jamais mesurée : elle correspond à 24 feV ou $3{,}8\,\mathrm{vJ} = 3{,}8 \cdot 10^{-33}\,\mathrm{J}$. Pour des particules isolées, le record semble être celui de neutrons : des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm.

Curiosités et défis amusants sur les unités

Le fait de ne pas utiliser les unités du SI peut coûter cher. En 1999, la NASA a perdu un satellite sur Mars parce que certains programmeurs de logiciels avaient utilisé des unités impériales* à la place des unités du SI dans des lignes de code. En conséquence, Mars Climate Orbiter s'écrasa sur la planète, au lieu de graviter autour de celle-ci. La perte fut évaluée à 100 millions d'euros environ**.

* *

Le *gray* est la quantité de radioactivité qui dépose 1 J sur 1 kg de matière. Le *sievert* est l'unité de radioactivité adaptée aux êtres humains en pondérant chaque type de tissu humain à l'aide d'un facteur représentatif de l'impact que le rayonnement dépose sur celui-ci. Quatre à cinq sieverts constituent une dose létale pour les êtres humains. En comparaison, la radioactivité naturelle présente à l'intérieur du corps humain conduit à une dose de 0,2 mSv par an. Une radiographie moyenne aux rayons X engendre une
Réf. 267 radiation de 1 mSv, un scanner, 8 mSv.

* Des unités de mesure anglo-saxonnes. [N.D.T.]

** Ce récit ranima une vieille (et fausse) rumeur qui affirme que seuls trois pays dans le monde n'utilisent pas les unités du SI : le Libéria, les États-Unis et la Birmanie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 10 Quelques valeurs mesurées de puissances visibles (intensités lumineuses).

OBSERVATION	INTENSITÉ LUMINEUSE
Flamme de bougie	1 cd
Lampe de poche	2 cd
Feux de position d'une voiture	10 cd
Plein phare d'une voiture (avec réflecteur, centre du faisceau)	60 cd
Lampe de cinéma	1,5 kcd
Flash photographique	1 Mcd
Phare	2 Mcd
Les plus gros projecteurs	80 Mcd

* *

Vous êtes décontenancés par la candela ? La définition dit simplement que 683 cd = 683 lm/sr correspond à 1 W/sr. La candela est donc une unité de la puissance lumineuse par angle (solide), ou d'*intensité lumineuse*, mis à part qu'elle est corrigée pour s'ajuster à la sensibilité de l'œil : la candela mesure simplement la puissance *visible* par unité d'angle.

De manière similaire, 683 lm = 683 cd sr correspond à 1 W. Donc le lumen et le watt mesurent tous les deux de la puissance, ou du flux d'énergie, mais le lumen mesure uniquement la partie *visible* de la puissance ou flux énergétique. Cette différence est exprimée en insérant les qualificatifs « radiant » ou « lumineux » : ainsi, le watt mesure le flux *radiant*, tandis que le lumen mesure le flux *lumineux*.

Le facteur 683 est d'origine historique. Une chandelle ordinaire émet une intensité lumineuse d'environ une candela. Par conséquent, la nuit, une chandelle peut être vue jusqu'à une distance de 10 ou 20 kilomètres. Une ampoule à incandescence de 100 W produit 1 700 lm, et les diodes émettrices de lumière les plus brillantes environ 5 lm. Les projecteurs de cinéma produisent environ 2 Mlm, et les flashs les plus intenses, comme l'éclair, 100 Mlm.

Défi 388 e

L'*éclairement énergétique* de la lumière du soleil est d'environ 1 300 W/m^2 lors d'une journée ensoleillée. Par ailleurs, l'*éclairement lumineux* n'est que de 120 klm/m^2 = 120 klux ou 170 W/m^2. (Une journée d'été recouverte de nuages ou une journée d'hiver dégagée produit environ 10 klux. L'éclairement lumineux est principalement ce que nous appelons la « luminosité » dans la vie courante.) Ces nombres indiquent que la plupart de l'énergie du Soleil qui parvient à la Terre se situe en dehors du spectre visible.

Sur un glacier, près de la côte, sur le sommet d'une montagne, ou lors de conditions météorologiques particulières, la luminosité peut atteindre 150 klux. Les lampes les plus brillantes, celles utilisées pendant les opérations chirurgicales, produisent 120 klux. Les hommes ont besoin d'environ 30 lux pour une lecture confortable. Les musées sont souvent maintenus dans l'obscurité parce que les peintures à l'eau sont dégradées par la lumière au-delà de 100 lux, et les peintures à l'huile au dessus de 200 lux. La pleine lune produit 0,1 lux, et le ciel lors d'une nuit sombre sans lune, environ 1 mlux. Les yeux conservent leur aptitude à distinguer les couleurs quelque part entre 0,1 lux et 0,01 lux,

Réf. 268

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 11 Quelques valeurs mesurées d'éclairements lumineux.

OBSERVATION	ÉCLAIREMENT LUMINEUX
Pâle étoile	0,1 nlx
Sirius	10 µlx
Le phot (ancienne unité d'éclairement lumineux)	10 µlx
Jupiter	20 µlx
Pleine Lune	0,01 à 0,24 lx
La rue la nuit, faible trafic, faible éclairage	0,1 à 3 lx
La rue la nuit, fort trafic	10 à 30 lx
Pour la lecture	50 à 100 lx
Écran de cinéma	100 lx
Lieu de travail	0,2 à 5 klx
Journée nuageuse	1 klx
Journée ensoleillée	120 klx
Film dans un projecteur de cinéma	5 Mlx
Douloureux pour l'œil	100 Mlx

l'œil cesse de remplir sa fonction en deçà de 1 nlux. Les dispositifs techniques qui produisent des images dans l'obscurité, telles que les lunettes de vision nocturne, commencent à fonctionner à partir de 1 µlux. Par ailleurs, le corps humain lui-même *brille* à environ 1 plux, une valeur trop faible pour pouvoir être décelée par l'œil, mais facilement mesurable à l'aide d'appareils spécialisés. La source de cette émission reste toujours du domaine de la recherche.

* *

Les plus fortes intensités lumineuses atteignent plus de 10^{18} W/m^2, soit plus de 15 ordres de grandeur au dessus de l'intensité de la lumière du soleil. Elles sont produites par des focalisations très étroites de lasers pulsés. Le champ électrique de ces impulsions lumineuses est du même ordre que le champ situé à l'intérieur des atomes, un tel faisceau ionise par conséquent toute la matière qu'il rencontre. Réf. 269

* *

La *densité lumineuse* est une quantité qui est souvent utilisée par les spécialistes de la lumière. Son unité est 1 cd/m^2, que l'on désigne officieusement 1 Nit et abrégé 1 nt. Les yeux voient, uniquement avec les bâtonnets, de 0,1 µcd/m^2 à 1 mcd/m^2, ils voient avec les cônes simplement au-dessus de 5 cd/m^2, la perception est meilleure entre 100 et 50 000 cd/m^2, et ils deviennent complètement éblouis au-delà de 10 Mcd/m^2 : soit une étendue totale de 15 ordres de grandeur.

* *

La longueur de Planck est approximativement égale à la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à son aise (m = 80 kg, v = 0,5 m/s), ce mouvement Réf. 270

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est par conséquent appelé à juste titre la « promenade de Planck ».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain, à l'âge de dix jours environ.

* *

La seconde ne correspond plus à 1/86 400ème du jour, bien que ce fût le cas en l'an 1900. La Terre met maintenant environ 86 400,002 s pour effectuer une rotation, de telle sorte que le *Service international de la rotation terrestre* doit régulièrement introduire une seconde intercalaire pour s'assurer que le Soleil est à son plus haut niveau dans le ciel à midi tapante*. Le temps défini de cette manière est appelé *Temps Universel Coordonné*. La vitesse de rotation de la Terre varie également de manière irrégulière d'un jour à l'autre à cause des conditions météorologiques, la vitesse de rotation moyenne fluctue même entre l'hiver et l'été à cause des changements qui surviennent dans les calottes glaciaires polaires, et de surcroît cette moyenne diminue au cours du temps à cause du frottement engendré par les marées. La fréquence d'insertion de ces secondes intercalaires est par conséquent supérieure à une fois tous les 500 jours, et n'est pas constante dans le temps.

* *

Les quantités mesurées de la manière la plus précise dans la nature sont les fréquences de certains pulsars millisecondes**, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites, et la constante de Rydberg de l'*hydrogène atomique*, qui peuvent toutes être mesurées aussi précisément qu'est définie la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur finie de sa raie spectrale, ce qui restreint la précision accessible : cette limite est d'environ 14 chiffres.

* *

L'horloge la plus précise jamais réalisée, en utilisant des micro-ondes, possède une stabi-
Réf. 271 lité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 fut d'environ 10^{-15}, mais des valeurs tournant autour de 10^{-17} semblent
Réf. 272 rester du domaine du technologiquement possible. La précision des horloges est limitée par le bruit pour des brèves durées de mesure, et pour des longues durées de mesure par des biais, c'est-à-dire par des effets systématiques. La région de la plus forte stabilité dépend du type d'horloge utilisée, elle se situe généralement entre 1 ms pour des horloges optiques et 5 000 s pour des masers. Les pulsars sont le seul type d'horloge pour lequel cette région n'est pas encore déterminée, elle se situe vraisemblablement à plus de 20 années, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre leur découverte et l'instant où nous écrivons ces lignes.

* *

* Leur site Web sur hpiers.obspm.fr donne plus de précisions sur les particularités de ces insertions, comme sur maia.usno.navy.mil, l'un des quelques sites Web militaires utiles. Consultez aussi www.bipm.fr, le site du BIPM.

** Un tour d'horizon de ce travail fascinant en est donné par J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* **341**, pp. 117–134, 1992.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les durées les plus brèves qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules « élémentaires ». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été évaluée à
Réf. 273 moins de 10^{-23} s. De telles périodes sont mesurées en utilisant une chambre à bulles, dans laquelle la trace est photographiée. Pouvez-vous estimer quelle est la longueur de cette
Défi 389 s trajectoire ? (C'est une question trompeuse – si votre longueur ne peut pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} années, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, soit 10^{32} années. Ces périodes sont donc beaucoup plus grandes
Réf. 274 que l'âge de l'univers, estimé à quatorze milliards d'années.

* *

Les constantes fondamentales de la physique mesurées avec le moins de précision sont la constante de la gravitation G et la constante de couplage de l'interaction forte α_s. L'âge de l'univers et sa densité sont déterminés avec encore moins de précision (regardez le
Page 289 Tableau 44).

* *

La précision des mesures de masse des solides est limitée par des effets simples tels que l'adsorption de l'eau. Pouvez-vous estimer la masse d'une monocouche d'eau – une
Défi 390 s couche ayant l'épaisseur d'une seule molécule – sur un métal pesant 1 kg ?

* *

Les variations des quantités sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte
Réf. 275 en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3 000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont dorénavant en train d'être surpassés par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquence de 10^{-21} ont déjà été construits,
Réf. 276 et ils sont toujours en cours de perfectionnement.

* *

L'astronome suédois Anders Celsius (1701–1744) fixa initialement le point de congélation de l'eau à 100 degrés et le point d'ébullition à 0 degré. Cette échelle fut inversée par la
Réf. 277 suite. Cependant, l'histoire ne se termine pas là. Avec la définition officielle du kelvin et du degré Celsius, à la pression standard de 1 013,25 Pa, l'eau bout à 99,974 °C. Pouvez-
Défi 391 s vous expliquer pourquoi ce n'est plus 100 °C ?

* *

Au cours du millénaire précédent, on avait coutume de mesurer l'énergie thermique en utilisant la *calorie* comme unité, notée cal. 1 cal est l'énergie nécessaire pour réchauffer 1 g d'eau de 1 K. Pour compliquer les choses, 1 kcal était souvent noté 1 Cal. (Nous parlions également de grande et de petite calorie.) 1 kcal vaut 4,1868 kJ.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Les unités du SI sont adaptées aux êtres humains : les valeurs du battement de cœur, de la taille humaine, du poids, de la température et de la quantité de substance d'un homme se rapprochent de la valeur unitaire à guère plus d'un couple d'ordres de grandeurs. Les unités du SI confirment donc (approximativement) ce que disait Protagoras il y a 25 siècles : « L'homme est la mesure de toutes choses ».

* *

Certains systèmes d'unités sont particulièrement mal adaptés aux hommes. Le plus infâme d'entre eux est la taille S des chaussures. C'est un nombre pur calculé ainsi :

$$\begin{aligned} S_{\text{France}} &= 1{,}5\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) \\ S_{\text{Europe centrale}} &= 1{,}5748\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) \\ S_{\text{Homme anglo-saxon}} &= 1{,}181\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) - 22 \end{aligned} \tag{294}$$

où l représente la longueur d'un pied et la correction de longueur dépend de l'entreprise de confection. De surcroît, la formule anglo-saxonne n'est pas valable pour les femmes et les enfants, où le premier facteur dépend, pour des raisons marketing, à la fois du fabricant et de la taille elle-même. Le standard ISO exige, de façon non surprenante, d'exprimer la longueur du pied en millimètres.

* *

Le tableau des préfixes du SI recouvre 72 ordres de grandeurs. Combien de préfixes supplémentaires seraient nécessaires ? Même une liste très longue n'incorporera qu'une partie infime de l'étendue infinie des possibilités. La Conférence Générale des Poids et Mesures devra-t-elle se poursuive éternellement, pour définir un nombre infini de préfixes du SI ? Pourquoi ?

Défi 392 s

* *

Le philosophe français Voltaire, après avoir rencontré Newton, publia l'histoire maintenant célèbre qui raconte que la correspondance entre la chute des objets et le mouvement de la Lune fut découverte par Newton lorsqu'il vit une pomme tomber d'un arbre. Plus d'un siècle plus tard, juste avant la Révolution Française, un jury de scientifiques décida de prendre comme unité de la force précisément celle exercée par la gravité sur une *pomme étalon*, et de la baptiser du nom de ce scientifique anglais. Après une étude approfondie, on trouva que la masse de la pomme étalon était de 101,9716 g, son poids fut donc appelé 1 newton. Depuis lors, les visiteurs du musée à Sèvres près de Paris ont eu la possibilité d'admirer le mètre étalon, le kilogramme étalon et la pomme étalon*.

* Pour être franc, c'est une blague : il n'existe aucune pomme étalon. Par contre, ce qui suit n'est *pas* une plaisanterie : des propriétaires de plusieurs pommiers en Grande-Bretagne et aux États-Unis prétendirent descendre, suite à un déracinement, de l'arbre original sous lequel Newton eut sont trait de génie. Des tests ADN ont même été réalisés pour décider s'ils dérivaient tous du même arbre. De façon non surprenante, le résultat a établi que l'arbre situé au MIT, contrairement à ceux de Grande-Bretagne, est un faux.

Réf. 278

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

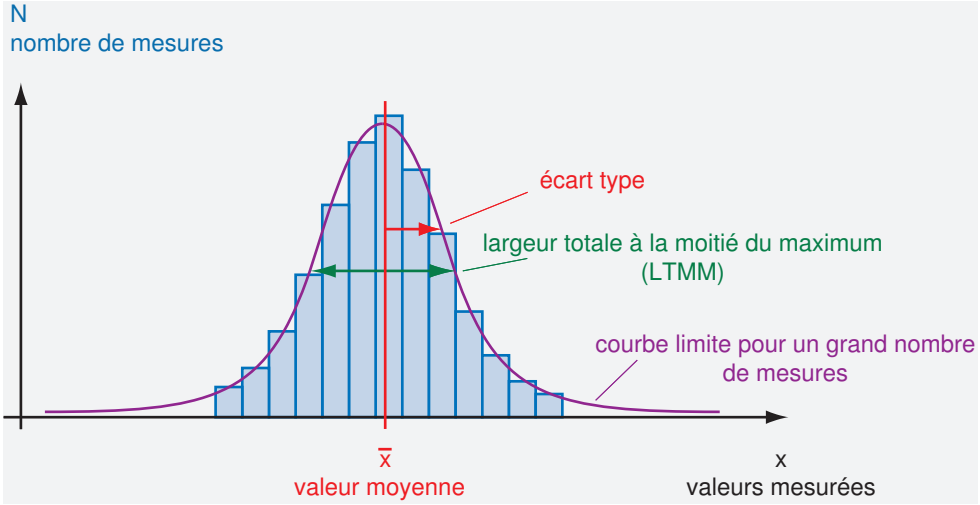


FIGURE 97 Une expérience de précision et sa distribution des mesures.

PRÉCISION ET EXACTITUDE DES MESURES

Comme nous l'avons expliqué à la page 286, la *précision* exprime dans quelle mesure un résultat est bien reproduit lorsque l'évaluation est réitérée, l'*exactitude* est le degré de correspondance d'une mesure à la véritable valeur. Le manque de précision est dû à des *erreurs aléatoires* ou accidentelles, la meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer l'*écart-type*, généralement noté σ, qui est défini par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \,, \tag{295}$$

où $\bar{x}$ représente la moyenne des mesures x_i. (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule au lieu de n ?) Défi 393 s

Pour la plupart des expériences, la distribution des valeurs des mesures tend vers une loi normale, également appelée *loi de Laplace–Gauss*, à partir du moment où nous accroissons le nombre de mesures. La distribution, indiquée dans la Figure 97, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \,. \tag{296}$$

Le carré de l'écart type, σ^2, est également appelé la *variance*. Pour une loi gaussienne des valeurs de mesure, $2,35\sigma$ est la largeur totale de la courbe à la moitié du maximum. Défi 394 e

Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*, on ne peut généralement que les estimer, seulement. Cette estimation est souvent ajoutée aux erreurs aléatoires pour produire une erreur expérimentale *totale*, également parfois dénommée *incertitude totale*. Réf. 279

Les tableaux qui suivent fournissent les valeurs des constantes physiques et des propriétés des particules les plus importantes, en unités du SI et dans quelques autres unités courantes, comme on les trouve dans les sources de référence. Ces valeurs sont les Réf. 280

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

moyennes mondiales des meilleures mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les biais expérimentaux, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type dans les derniers chiffres, par exemple 0,31(6) signifie – *grosso modo* – $0,31 \pm 0,06$. En réalité, derrière chacun des nombres qui apparaissent dans les tableaux suivants se cache une longue histoire qu'il serait digne de conter, mais pour lesquelles nous n'avons pas suffisamment de place ici*.

Quelles sont les limites à l'exactitude et à la précision ? Il n'existe aucun procédé, même en principe, permettant de mesurer une longueur x jusqu'à une *précision* supérieure à environ 61 chiffres, parce que $\Delta x/x > l_{\mathrm{Pl}}/d_{\mathrm{horizon}} = 10^{-61}$. (Cela est-il également vrai pour la force ou pour le volume ?) Dans la dernière partie de notre texte, l'examen des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique.

Défi 395 pe
Page ??

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus strictes. Aucune machine imaginable ne peut mesurer des quantités avec une précision plus élevée que la mesure du diamètre de la Terre à une incertitude près égale à la longueur la plus petite jamais mesurée, soit 10^{-19} m environ, c'est-à-dire environ 26 chiffres de précision. En utilisant une limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1 000 m, on obtient une limite de 22 chiffres. Si, comme nous l'avons prédit plus haut, les mesures du temps atteignent vraiment 17 chiffres de précision, alors elles seront proches de la limite pratique, parce que mis à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire : le coût. En réalité, un chiffre supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent qu'il faille un chiffre supplémentaire dans le coût de l'équipement.

Constantes physiques fondamentales

Réf. 280

En principe, toutes les propriétés quantitatives de la matière peuvent être calculées avec la théorie quantique. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques peuvent être prédites en faisant appel aux valeurs des constantes qui suivent, en utilisant les équations du modèle standard de la physique des hautes énergies.

TABLEAU 12 Constantes physiques fondamentales.

Quantité	Symbole	Valeur unités SI	Incert.[a]
nombre de dimensions d'espace-temps		3 + 1	0 [b]
vitesse de la lumière dans le vide[c]	c	299 792 458 m/s	0
perméabilité magnétique du vide[c]	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	0
		= 1,256 637 061 435 ... μH/m	0
permittivité diélectrique du vide[c]	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8,854 187 817 620 ... pF/m	0
constante de Planck originale	h	$6,626\,068\,76(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
constante de Planck réduite	$\hbar$	$1,054\,571\,596(82) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
charge du positron	e	0,160 217 646 2(63) aC	$3,9 \cdot 10^{-8}$

* Certains de ces récits peuvent être retrouvés dans l'ouvrage de N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, à partir duquel sont tirés les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une magnifique introduction en est donnée par J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero : Frontiers of Physics*, Freeman, 1988.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.[a]
constante de Boltzmann	k	$1{,}380\,650\,3(24)\cdot 10^{-23}$ J/K	$1{,}7\cdot 10^{-6}$
constante gravitationnelle	G	$6{,}673(10)\cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1{,}5\cdot 10^{-3}$
constante de couplage gravit.	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2{,}076(3)\cdot 10^{-43}$ s^2/kg m	$1{,}5\cdot 10^{-3}$
constante de structure fine[d],	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	$1/137{,}035\,999\,76(50)$	$3{,}7\cdot 10^{-9}$
constante de couplage e.m.	$= g_{\text{em}}(m_e^2c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,533(27)$	$3{,}7\cdot 10^{-9}$
constante de couplage de Fermi[d],	$G_F/(\hbar c)^3$	$1{,}166\,39(1)\cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$8{,}6\cdot 10^{-6}$
constante de couplage faible	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	$1/30{,}1(3)$	$1\cdot 10^{-2}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	$0{,}231\,24(24)$	$1{,}0\cdot 10^{-3}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W$ (enveloppe)	$0{,}2224(19)$	$8{,}7\cdot 10^{-3}$
	$= 1-(m_W/m_Z)^2$		
constante de couplage fort[d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	$0{,}118(3)$	$25\cdot 10^{-3}$

a. Incertitude : écart-type des erreurs de mesure.
b. De 10^{-19} m et jusqu'à 10^{26} m, uniquement.
c. Définition numérique de la constante. (La permittivité diélectrique du vide est aussi appelée constante électrique et la perméabilité du vide, constante magnétique [N.D.T.].)
d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion de $Q^2 = m_e^2c^2$, ce qui est la valeur la plus petite possible. Pour des transferts d'impulsion plus élevés elle possède des valeurs plus grandes, par exemple $g_{\text{em}}(Q^2 = M_W^2c^2) \approx 1/128$. La constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs supérieures pour des transferts d'impulsion moins importants, par exemple $\alpha_s(34\,\text{GeV}) = 0{,}14(2)$.

Page ??

Pourquoi toutes ces constantes possèdent-elles les valeurs qu'elles ont ? La réponse est différente dans chacune des situations. Pour toute constante possédant une dimension, tel que le quantum d'action $\hbar$, la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1{,}054\cdot 10^{-34}$ Js à cause de la définition du SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante dimensionnelle n'est pas plus grande ni plus petite nous oblige toujours à comprendre l'origine de certains nombres sans dimension qui donnent le rapport entre la constante et l'unité naturelle correspondante. La compréhension des tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, de la durée des processus moléculaires et atomiques, ou de la masse des noyaux et des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clé de la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et ainsi de toutes les constantes sans dimension. L'histoire des rapports les plus importants est contée dans la partie qui conclut cette aventure.

Les constantes fondamentales engendrent les observations utiles suivantes, de haute précision.

TABLEAU 13 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376,730 313 461 77... Ω	0
nombre d'Avogadro	N_A	$6{,}022\,141\,99(47)\cdot 10^{23}$	$7{,}9\cdot 10^{-8}$
constante de Rydberg[a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$10\,973\,731{,}568\,549(83)\,\text{m}^{-1}$	$7{,}6\cdot 10^{-12}$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 916 96(28) µS	$3,7 \cdot 10^{-9}$
quantum du flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 636(81) pWb	$3,9 \cdot 10^{-8}$
rapport de fréquence de Josephson	$2e/h$	483,597 898(19) THz/V	$3,9 \cdot 10^{-8}$
constante de von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 572(95) Ω	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 008 99(37) yJ/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 4925(11) GHz/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 m_e c^2$	2,817 940 285(31) fm	$1,1 \cdot 10^{-8}$
longueur d'onde de Compton	$\lambda_c = h/m_e c$	2,426 310 215(18) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
de l'électron	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0,386 159 264 2(28) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
rayon de Bohr[a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 720 83(19) pm	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	5,050 783 17(20) $\cdot 10^{-27}$ J/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rapport de masse proton–électron	m_p/m_e	1 836,152 667 5(39)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
constante de Stefan–Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,704 00(40) nW/m^{2}K^4	$7,0 \cdot 10^{-6}$
constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{max} T$	2,897 768 6(51) mmK	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante de conversion de bits en entropie		10^{23} bit = 0,956 994 5(17) J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
contenu énergétique du TNT		de 3,7 à 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Certaines propriétés générales de la nature sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, pouvez-vous déterminer si une quelconque propriété de l'Univers lui-même est listée ?)

Défi 396 s

TABLEAU 14 Constantes astrophysiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante gravitationnelle	G	6,672 59(85) $\cdot 10^{-11}$ m^3/kg s^2
constante cosmologique	Λ	env. $1 \cdot 10^{-52}$ m^{-2}
année tropicale en 1900[a]	a	31 556 925,974 7 s
année tropicale en 1994	a	31 556 925,2 s
jour sidéral moyen	d	$23^h 56' 4,090\,53''$
année-lumière	al	9,460 528 173 … Pm
unité astronomique[b]	ua	149 597 870,691(30) km
parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
âge de l'Univers[c]	t_0	4,333(53) $\cdot 10^{17}$ s = 13,73(0,17) $\cdot 10^9$ a
(déterminé par l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
âge de l'Univers[c]	t_0	3,5(4) $\cdot 10^{17}$ s = 11,5(1,5) $\cdot 10^9$ a, au plus
(déterminé par la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la mécanique quantique)		
constante de Hubble[c]	H_0	2,3(2) $\cdot 10^{-18}$ s^{-1} = 0,73(4) $\cdot 10^{-10}$ a^{-1}
	$H_0 = h_0 \cdot 100$ km/sMpc = $h_0 \cdot 1{,}0227 \cdot 10^{-10}$ a^{-1}	

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante de Hubble réduite[c]	h_0	0,71(4)
paramètre de décélération	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	$-0,66(10)$
distance de l'horizon de l'Univers[c]	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26}$ m = 13,0(2) Gpc
topologie de l'Univers		inconnue
nombre de dimensions spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
densité critique	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
de l'Univers		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
paramètre de densité (totale)[c]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
paramètre de densité baryonique[c]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
paramètre de densité	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
de matière noire froide[c]		
paramètre de densité des neutrinos[c]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0,001 à 0,05
paramètre de densité	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
de l'énergie sombre[c]		
paramètre de l'équation d'état	$w = p_X/\rho_X$	$-1,0(2)$
de l'énergie sombre		
masse baryonique	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27}$ kg
densité baryonique		0,25(1) /m^3
densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28}$ kg/m^3
étoiles dans l'Univers	n_e	$10^{22\pm1}$
baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81\pm1}$
température du fond diffus	T_0	2,725(1) K
micro-onde[d]		
photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31}$ kg/m^3
densité de photons		410,89 /cm^3 ou 400 /cm^3 $(T_0/2,7\,\mathrm{K})^3$
amplitude des perturbations	$\sqrt{S}$	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
de densité		
amplitude des ondes	$\sqrt{T}$	$< 0,71\sqrt{S}$
gravitationnelles		
fluctuations de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
indice spectral scalaire	n	0,93(3)
variation de l'indice spectral	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	-0,03(2)
longueur de Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35}$ m
temps de Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44}$ s
masse de Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 µg
nombre d'instants dans l'histoire[c]	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
points de l'espace-temps	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot$	$10^{244\pm1}$
dans l'horizon[c]	(t_0/t_{Pl})	
masse dans l'horizon	M	$10^{54\pm1}$ kg

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

a. Définition de la constante, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Rappelez-vous : π secondes représentent à peu près un nanosiècle.) La valeur de 1990 compte environ 0,7 s de moins, correspondant à un ralentissement d'approximativement 0,2 ms/a. (Faites attention : pourquoi ?) Il existe même une formule empirique pour évaluer la variation de la durée de l'année au cours du temps.

Défi 397 s
Réf. 281

b. Distance moyenne Terre–Soleil. Cette précision vraiment stupéfiante de 30 m résulte des durées moyennes de propagation des signaux envoyés par les navettes spatiales Viking en orbite et les atterrisseurs martiens, récoltées durant une période de plus de vingt ans.

c. L'indice 0 représente les valeurs d'aujourd'hui.

d. Ce rayonnement fut produit lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3 000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui déclenchèrent la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4\,\mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6}\ T_0$.

Page 210

Soyez vigilants : dans l'ultime partie de cet ouvrage on montre qu'un grand nombre des constantes du Tableau 14 *ne* sont *pas* des quantités physiquement raisonnables. Elles doivent être considérées avec beaucoup de circonspection. Les constantes plus spécifiques données dans le tableau qui suit sont toutes raisonnables, cependant.

TABLEAU 15 Constantes astronomiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
masse de la Terre	$M_{♁}$	$5{,}972\,23(8) \cdot 10^{24}$ kg
longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{♁} = 2GM/c^2$	8,870(1) mm
rayon de la Terre, à l'équateur[a]	$R_{♁\text{eq}}$	6 378,1367(1) km
rayon de la Terre, aux pôles[a]	$R_{♁\text{p}}$	6 356,7517(1) km
distance Équateur–pôle[a]		10 001,966 km (moyenne)
aplatissement de la Terre[a]	$e_{♁}$	1/298, 25231(1)
densité moyenne de la Terre	$\rho_{♁}$	5,5 Mg/m^3
âge de la Terre	$T_{♁}$	4,55 Ga = 143 Ps
rayon de la Lune	$R_{☾\,\text{v}}$	1 738 km dans la direction de la Terre
rayon de la Lune	$R_{☾\,\text{h}}$	1 737,4 km dans les deux autres directions
masse de la Lune	$M_{☾}$	$7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg
distance moyenne de la Lune[b]	$d_{☾}$	384 401 km
distance de la Lune au périgée[b]		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
distance de la Lune à l'apogée[b]		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
taille angulaire de la Lune[c]		en moyenne $0,5181° = 31,08'$, minimum $0,49°$, maximum - ligne la plus courte $0,55°$
densité moyenne de la Lune	$\rho_{☾}$	3,3 Mg/m^3
masse du Soleil	$M_{☉}$	$1{,}988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
longueur gravitationnelle du Soleil	$l_{☉} = 2GM_{☉}/c^2$	2,953 250 08 km
luminosité du Soleil	$L_{☉}$	384,6 YW
rayon solaire équatorial	$R_{☉}$	695,98(7) Mm

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Quantité	Symbole	Valeur
taille angulaire du Soleil		0,53° en moyenne ; minimum le quatre juillet (aphélie) 1888″, maximum le quatre janvier (périhélie) 1952″
densité moyenne du Soleil	$\rho_\odot$	1,4 Mg/m^3
distance moyenne du Soleil	UA	149 597 870,691(30) km
âge du Soleil	$T_\odot$	4,6 Ga
vitesse solaire autour du centre de la galaxie	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
vitesse solaire par rapport au fond diffus cosmologique	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
distance au centre galactique		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
âge de la Voie lactée		13,6 Ga
taille de la Voie lactée		env. 10^{21} m ou 100 kal
masse de la Voie lactée		10^{12} masses solaires, env. $2 \cdot 10^{42}$ kg
masse de Jupiter	$M_{♃}$	$1{,}90 \cdot 10^{27}$ kg
rayon jovien équatorial	$R_{♃}$	71,398 Mm
rayon jovien polaire	$R_{♃}$	67,1(1) Mm
distance moyenne de Jupiter au Soleil	$D_{♃}$	778 412 020 km
galaxie connue la plus éloignée	1835 IR1916	$13{,}2 \cdot 10^9$ al = $1{,}25 \cdot 10^{26}$ m, redshift 10

a. La forme de la Terre est décrite de la manière la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation largement développée de ses contextes et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union Géodésique et Géophysique Internationale révisa les données en l'an 2000. Les rayons et l'aplatissement donnés ici sont ceux du système de marée « mean tide system ». Ils diffèrent de 0,7 m environ de ceux du système de marée « zero tide system » et de d'autres systèmes. Les particularités de ce domaine représentent une science à part.
b. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, consultez la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html et les autres pages du même site.
c. Les angles sont définis comme suit : 1 degré = 1° = π/180 rad, 1 (première) minute d'arc = 1′ = 1°/60, 1 seconde (minute) d'arc = 1″ = 1′/60. Les anciennes unités « tierce minute d'arc » et « quarte minute d'arc », valant chacune 1/60e de la précédente, ne sont plus utilisées. (« Minute » signifiait à l'origine « très petit », comme c'est toujours le cas dans l'anglais moderne.)

Nombres utiles

π	3, 14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510$_5$
e	2, 71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995$_9$
γ	0, 57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992$_3$
ln 2	0, 69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025$_5$
ln 10	2, 30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877$_2$
$\sqrt{10}$	3, 16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521$_6$

Réf. 282

Si le nombre π est *normal*, c'est-à-dire si les chiffres et les combinaisons de chiffres

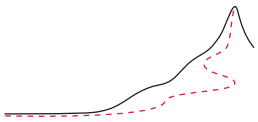
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dans ses développements décimaux apparaissent tous avec la même fréquence limite, alors tous les textes qui ont été écrits ou qui vont l'être, de même que tous les mots qui ont été prononcés ou qui vont l'être, peuvent être retrouvés de manière codée dans ses suites. La propriété de normalité n'a pas encore été démontrée, bien qu'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la science soit encodée dans le simple cercle ? Non. Cette propriété n'a rien de particulier : elle s'applique également au nombre 0, 12345678910111213141516171819202 1.... et de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples ?

Défi 398 s

Par ailleurs, dans le graphe de la fonction exponentielle e^x, le point $(0,1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez colorier en bleu tous les points situés sur le plan et ayant deux coordonnées rationnelles, ce plan paraîtrait quasiment bleu. Néanmoins, le graphe passe par un de ces points seulement et parvient à éviter tous les autres.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



BIBLIOGRAPHIE

> « Un homme retournera la moitié d'une bibliothèque pour ne produire qu'un seul livre. »
> Samuel Johnson*

1 Aristote, De la sensation et des sensibles, section 1, partie 1, 350 av. J.-C. Cité dans Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 157, 1991. Cité en page 16.

2 Le récit historique de la mesure de la vitesse de la lumière peut être compulsé dans le chapitre 19 de l'ouvrage de Francis A. Jenkins & Harvey E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, New York, 1957. Cité en page 17.

3 Sur la manière de réaliser de telles mesures, lisez Sydney G. Brewer, *Do-it-yourself Astronomy*, Edinburgh University Press, 1988. Kepler lui-même n'a jamais mesuré les distances des planètes au Soleil, mais uniquement les *rapports* des distances planétaires. La parallaxe du Soleil mesurée à partir de deux points distincts sur Terre est tout au plus de 8,79″. Elle fut mesurée pour la première fois au dix-huitième siècle. Cité en page 18.

4 Aristarque, On the sizes and the distances of the Sun and the Moon, v. 280 av. J.-C., dans Michael J. Crowe, *Theories of the World From Antiquity to the Copernican Revolution*, Dover, 1990. Cité en page 18.

5 J. Frercks, Creativity and technology in experimentation : Fizeau's terrestrial determination of the speed of light, *Centaurus* **42**, pp. 249–287, 2000. Voyez également le magnifique site Web sur les reconstitutions d'expériences scientifiques historiques : http://www.uni-oldenburg.de/histodid/forschung/nachbauten. Cité en page 19.

6 La manière de produire des images de signaux lumineux à l'aide d'un appareil photographique ordinaire, sans électronique, est décrite par M. A. Duguay & A. T. Mattick, Ultrahigh speed photography of picosecond light pulses and echoes, *Applied Optics* **10**, pp. 2162–2170, 1971. La photographie de la page 19 est tirée de celui-ci. Cité en page 20.

7 Vous pouvez apprendre les bases de la relativité restreinte en surfant sur le Web, sans l'assistance d'aucun manuel, en prenant pour point de départ le site http://physics.syr.edu/research/relativity/RELATIVITY.html. Cette page fait référence à la majorité des ressources disponibles sur le Web sur la relativité, bien qu'en langue anglaise. Des liens vers d'autres langues peuvent être trouvés à l'aide des moteurs de recherche. Cité en page 20.

8 Des observations sur les sursauts de rayons gamma montrent que la vitesse de la lumière ne dépend pas de la vitesse de la source à moins d'une partie pour 10^{20} près, comme indiqué par K. Brecher, *Bulletin of the American Physical Society* **45**, 2000. Il émit l'hypothèse que les deux côtés de l'astre en explosion émettent de la lumière. La grande différence de vitesse et l'acuité de la pulsation conduisent alors à ce résultat. Lisez également son ancien

* Samuel Johnson (1709–1784) fut un célèbre poète et intellectuel anglais.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

article K. Brecher, Is the speed of light independent of the source ?, *Physics Letters* **39**, pp. 1051–1054, Errata 1236, 1977. Une autre piste consiste à mesurer la vitesse de la lumière à partir d'étoiles en mouvement rapide. Certaines de ces expériences ne sont toutefois pas complètement irréfutables. Il existe une théorie alternative de l'électrodynamique, due à Ritz, qui soutient que la vitesse de la lumière est c uniquement lorsqu'elle est mesurée par rapport à la source. La lumière issue des étoiles, cependant, traverse l'atmosphère, et sa vitesse peut donc être réduite à c.

L'expérience célèbre utilisant la lumière émise par des mésons pi rapides au CERN n'est pas sujette à cette critique. Elle est décrite dans T. Alväger, J. M. Bailey, F. J. M. Farley, J. Kjellman & I. Wallin, Test of the second postulate of relativity in the GeV region, *Physics Letters* **12**, pp. 260–262, 1964. Lisez également T. Alväger & al., Velocity of high-energy gamma rays, *Arkiv för Fysik* **31**, pp. 145–157, 1965.

Une autre expérience précise dans le domaine des vitesses extrêmes est décrite par G. R. Kalbfleisch, N. Baggett, E. C. Fowler & J. Alspector, Experimental comparison of neutrino, anti-neutrino, and muon velocities, *Physical Review Letters* **43**, pp. 1361–1364, 1979. Cité en page 21.

9 Lisez par exemple C. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Revised edition, Cambridge University Press, 1993. Cité aux pages 21 et 23.

10 B. E. Schaefer, Severe limits on variations of the speed of light with frequency, *Physical Review Letters* **82**, pp. 4964–4966, 21 juin 1999. Cité en page 22.

11 La théorie moderne de la relativité a vu le jour dans le célèbre article d' Albert Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik* **17**, pp. 891–921, 1905. Il est toujours d'une très grande importance, et chaque physicien devrait l'avoir consulté. La même chose peut être dite à propos du célèbre article, probablement rédigé après qu'il eut entendu parler de l'idée d'Olinto De Pretto, que l'on peut trouver dans Albert Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik* **18**, pp. 639–641, 1905. Lisez également ses réflexions : Albert Einstein, Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* **4**, pp. 411–462, 1907. Ces articles sont maintenant disponibles dans plusieurs langues. La copie d'une revue de détail ultérieure, non publiée, est disponible en traduction anglaise dans Albert Einstein, Hanoch Gutfreund, ed., *Einstein's 1912 Manuscript on the Theory of Relativity*, George Braziller, 2004. Cité aux pages 22, 24 et 65.

12 Albert Einstein, *Mein Weltbild*, édité par Carl Selig, Ullstein Verlag, 1998. Cité en page 22.

13 Jean van Bladel, *Relativity and Engineering*, Springer, 1984. Cité en page 22.

14 Albrecht Fölsing, *Albert Einstein – eine Biographie*, Suhrkamp p. 237, 1993. Cité aux pages 23 et 33.

15 R. J. Kennedy & E. M. Thorndike, Experimental establishment of the relativity of time, *Physical Review* **42**, pp. 400–418, 1932. Lisez aussi H. E. Ives & G. R. Stilwell, An experimental study of the rate of a moving atomic clock, *Journal of the Optical Society of America* **28**, pp. 215–226, 1938, et **31**, pp. 369–374, 1941. Pour une adaptation moderne très précise, consultez C. Braxmeier, H. Müller, O. Pradl, J. Mlynek, A. Peters & S. Schiller, New tests of relativity using a cryogenic optical resonator, *Physical Review Letters* **88**, p. 010401, 2002. Les dernières nouvelles sont dans P. Antonini, M. Okhapkin, E. Göklü & S. Schiller, Testing the constancy of the speed of light with rotating cryogenic optical resonators, *Physical Review A* **71**, p. 050101, 2005, ou http://arxiv.org/abs/gr-qc/0504109. Cité en page 23.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

16 Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992. Voyez également Nick M. J. Woodhouse, *Special Relativity*, Springer, 2003. Cité aux pages 25 et 74.

17 Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001. Un ouvrage admirable rédigé par un des spécialistes de ce domaine. Cité aux pages 25 et 79.

18 La lenteur de la vitesse de la lumière à l'intérieur des étoiles est due à la diffusion incessante des photons par la matière de l'astre. L'estimation la plus courante pour la durée d'échappement dans le Soleil est de 40 000 ans à 1 million d'années, mais des estimations situées entre 17 000 ans et 50 millions d'années peuvent être rencontrées dans la littérature. Cité en page 24.

19 L. Vestergaard Hau, S. E. Harris, Z. Dutton & C. H. Behroozi, Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas, *Nature* **397**, pp. 594–598, 1999. Lisez aussi **?**. Cité en page 24.

20 La manière d'exposer la relativité restreinte en dessinant quelques lignes sur une feuille est due à Hermann Bondi, *Relativity and Common Sense : A New Approach to Einstein*, Dover, New York, 1980. Voyez également Dierck-Ekkehard Liebscher, *Relativitätstheorie mit Zirkel und Lineal*, Akademie-Verlag Berlin, 1991. Cité en page 24.

21 Rod S. Lakes, Experimental limits on the photon mass and cosmic vector potential, *Physical Review Letters* **80**, pp. 1826–1829, 1998. La vitesse de la lumière est indépendante de la fréquence à moins d'un facteur $6 \cdot 10^{-21}$ près, comme les études sur les rayons gamma de B. E. Schaefer, Severe limits on variations of the speed of light with frequency, *Physical Review Letters* **82**, pp. 4964–4966, 1999, l'ont montré. Cité en page 27.

22 Un tour d'horizon des résultats expérimentaux est fourni par Yuan Zhong Zhang, *Special Relativity and its Experimental Foundations*, World Scientific, 1998. Cité aux pages 27, 32, 44, 59, 88 et 297.

23 R. W. McGowan & D. M. Giltner, New measurement of the relativistic Doppler shift in neon, *Physical Review Letters* **70**, pp. 251–254, 1993. Cité en page 28.

24 Le record actuel de synchronisation d'horloges semble être de 1 ps pour deux horloges distantes de 3 km l'une de l'autre. Lisez A. Valencia, G. Scarcelli & Y. Shih, Distant clock synchronization using entangled photon pairs, *Applied Physics Letters* **85**, pp. 2655–2657, 2004, ou http://arxiv.org/abs/quant-ph/0407204. Cité en page 29.

25 J. Frenkel & T. Kontorowa, Über die Theorie der plastischen Verformung, *Physikalische Zeitschrift der Sowietunion* **13**, p. 1, 1938. F. C. Frank, On the equations of motion of crystal dislocations, *Proceedings of the Physical Society A* **62**, pp. 131–134, 1949. J. Eshelby, Uniformly moving dislocations, *Proceedings of the Physical Society A* **62**, pp. 307–314, 1949. Voyez aussi G. Leibfried & H. Dietze, *Zeitschrift für Physik* **126**, p. 790, 1949. Une introduction générale peut être trouvée dans A. Seeger & P. Schiller, Kinks in dislocation lines and their effects in internal friction in crystals, *Physical Acoustics* **3A**, W. P. Mason, ed., Academic Press, 1966. Lisez également les manuels de Frank R. N. Nabarro, *Theory of Crystal Dislocations*, Oxford University Press, 1967, ou J. P. Hirth & J. Lothe, *Theory of Dislocations*, McGraw Hill, 1968. Cité en page 30.

26 Ce merveilleux graphique est tiré de Z. G. T. Guiragossian, G. B. Rothbart, M. R. Yearian, R. Gearhart & J. J. Murray, Relative velocity measurements of electrons and gamma rays at 15 GeV, *Physical Review Letters* **34**, pp. 335–338, 1975. Cité en page 30.

27 Pour en savoir plus sur ces cinglés très connus et sur leurs idées, envoyez un courriel à

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

majordomo@zikzak.net avec cette seule ligne comme message « subscribe psychoceramics ». Cité en page 31.

28 La vitesse des neutrinos est identique à celle de la lumière à 9 décimales près. Cela est expliqué par Leo Stodolsky, The speed of light and the speed of neutrinos, *Physics Letters B* **201**, p. 353, 1988. Une observation de la masse minuscule du neutrino a été publiée par la collaboration japonaise du Super-Kamiokande, dans Y. Fukuda & al., Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, *Physical Review Letters* **81**, pp. 1562–1567, 1998. Les nouveaux résultats publiés par l'Observatoire canadien du neutrino à Sudbury, comme Q.R. Ahmad & al., Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, *Physical Review Letters* **89**, p. 011301, 2002, confirment également que les neutrinos ont une masse dans la région de 1 eV. Cité aux pages 31 et 321.

29 B. Rothenstein & G. Eckstein, Lorentz transformations directly from the speed of light, *American Journal of Physics* **63**, p. 1150, 1995. Lisez aussi le commentaire de E. Kapuścik, Comment on « Lorentz transformations directly from the speed of light », by B. Rothenstein and G. Eckstein, *American Journal of Physics* **65**, p. 1210, 1997. Cité en page 33.

30 Lisez par exemple les conférences de 1922 données par Lorentz à Caltech, publiées dans H. A. Lorentz, *Problems of Modern Physics*, édité par H. Bateman, Ginn and Company, page 99, 1927. Cité en page 33.

31 A. A. Michelson & E. W. Morley, On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether, *American Journal of Science (3rd series)* **34**, pp. 333–345, 1887. Michelson a publié de nombreux autres articles sur ce sujet après celui-ci. Cité en page 33.

32 S. Schiller, P. Antonini & M. Okhapkin, A precision test of the isotropy of the speed of light using rotating cryogenic optical cavities, http://arxiv.org/abs/physics/0510169. Cité en page 33.

33 H. A. Lorentz, De relative beweging van de aarde en dem aether, *Amst. Versl.* **1**, p. 74, 1892, et aussi H. A. Lorentz, Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Amst. Proc.* **6**, p. 809, 1904, ou *Amst. Versl.* **12**, p. 986, 1904. Cité en page 37.

34 Une réfutation globale de ces propositions est discutée par S. R. Mainwaring & G. E. Stedman, Accelerated clock principles, *Physical Review A* **47**, pp. 3611–3619, 1993. Des expériences sur les *muons* au CERN en 1968 montrèrent que des accélérations allant jusqu'à 10^{20} m/s^2 n'ont aucune incidence, comme l'expliquent D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Addison-Wesley, 1972, et J. Bailey & al., *Il Nuovo Cimento* **9A**, p. 369, 1972. Cité en page 37.

35 W. Rindler, General relativity before special relativity : an unconventional overview of relativity theory, *American Journal of Physics* **62**, pp. 887–893, 1994. Cité en page 38.

36 Steven K. Blau, Would a topology change allow Ms. Bright to travel backward in time ?, *American Journal of Physics* **66**, pp. 179–185, 1998. Cité en page 40.

37 Sur la formulation de la relativité en termes de quantités « propres », lisez par exemple D. Hestenes, Proper particle mechanics, *Journal of Mathematical Physics* **15**, pp. 1768–1777, 1974. Cité en page 41.

38 L'expérience élémentaire qui consiste à emporter une horloge précise dans un avion, à voler avec tout autour du globe et à la comparer alors à une autre identique que nous avons pris soin de laisser au sol fut réalisée pour la première fois par J. C. Hafele & R. E. Keating, Around-the-world atomic clocks : predicted relativistic time gains, *Science* **177**, pp. 166–167, et Around-the-world atomic clocks : observed relativistic time gains, pp. 168–170, 14 juillet 1972. Voyez également Réf. 22. Cité en page 41.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

39 Une introduction compréhensible à la dilatation du temps pour des observateurs, et à la relativité générale : Roman U. Sexl & Herbert Kurt Schmidt, *Raum-Zeit-Relativität*, 2. Auflage, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1991. Cité en page 41.

40 La plus célèbre d'entre elles est la découverte que des muons qui se déplacent restent plus jeunes, comme l'indiquent par exemple D. H. Frisch & J. B. Smith, Measurement of the relativistic time dilation using μ-mesons, *American Journal of Physics* **31**, pp. 342–355, 1963. Pour un exposé complet et pédagogique sur le paradoxe des jumeaux, lisez E. Sheldon, Relativistic twins or sextuplets ?, *European Journal of Physics* **24**, pp. 91–99, 2003. Cité en page 42.

41 Paul J. Nahin, *Time Machines – Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, Springer Verlag et aip Press, second edition, 1999. Cité en page 43.

42 La première expérience sur le muon fut : B. Rossi & D. B. Hall, Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum, *Physical Review* **59**, pp. 223–228, 1941. Le « mésotron » est l'ancienne dénomination du muon. Cité en page 43.

43 A. Harvey & E. Schucking, A small puzzle from 1905, *Physics Today*, pp. 34–36, Mars 2005. Cité en page 44.

44 W. Rindler, Length contraction paradox, *American Journal of Physics* **29**, pp. 365–366, 1961. Pour une version sans la gravitation, lisez R. Shaw, Length contraction paradox, *American Journal of Physics* **30**, p. 72, 1962. Cité en page 46.

45 H. van Lintel & C. Gruber, The rod and hole paradox re-examined, *European Journal of Physics* **26**, pp. 19–23, 2005. Cité en page 46.

46 Cette situation est analysée par G. P. Sastry, Is length contraction paradoxical ?, *American Journal of Physics* **55**, 1987, pp. 943–946. Cet article contient également une vaste bibliographie recouvrant des variantes des paradoxes sur la contraction des longueurs. Cité en page 46.

47 S. P. Boughn, The case of the identically accelerated twins, *American Journal of Physics* **57**, pp. 791–793, 1989. Cité aux pages 46 et 50.

48 J. M. Supplee, Relativistic buoyancy, *American Journal of Physics 57* **1**, pp. 75–77, janvier 1989. Lisez aussi G. E. A. Matsas, Relativistic Arquimedes law for fast moving bodies and the general-relativistic resolution of the "submarine paradox", *Physical Review D* **68**, p. 027701, 2003, ou http://arxiv.org/abs/gr-qc/0305106. Cité en page 47.

49 Cette distinction fut établie pour la première fois par J. Terrell, Invisibility of Lorentz contraction, *Physical Review* **116**, pp. 1041–1045, 1959, et R. Penrose, The apparent shape of a relativistically moving sphere, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **55**, pp. 137–139, 1959. Cité en page 49.

50 G. R. Rybicki, Speed limit on walking, *American Journal of Physics* **59**, pp. 368–369, 1991. Cité en page 51.

51 Les premiers exemples de telles observations astronomiques furent donnés par A.R. Whitney & al., Quasars revisited : rapid time variations observed via very-long-baseline interferometry, *Science* **173**, pp. 225–230, 1971, et par M.H. Cohen & al., The small-scale structure of radio galaxies and quasi-stellar sources at 3.8 centimetres, *Astrophysical Journal* **170**, pp. 207–217, 1971. Lisez aussi T. J. Pearson, S. C. Unwin, M. H. Cohen, R. P. Linfield, A. C. S. Readhead, G. A. Seielstad, R. S. Simon & R. C. Walker, Superluminal expansion of quasar 3C 273, *Nature* **290**, pp. 365–368, 1981. Un aperçu en est donné dans J. A. Zensus & T. J. Pearson, editors, *Superluminal radio sources*, Cambridge University Press, 1987. Une autre mesure, utilisant l'interférométrie à très longue base avec des ondes radio, a été représentée sur la couverture de *Nature* :

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

I. F. Mirabel & L. F. Rodriguez, A superluminal source in the galaxy, *Nature* **371**, pp. 46–48, 1994. Un exemple plus récent a été signalé dans *Science News* **152**, p. 357, 6 décembre 1997.

Des explications pédagogiques sont fournies par D. C. Gabuzda, The use of quasars in teaching introductory special relativity, *American Journal of Physics* **55**, pp. 214–215, 1987, et par Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992, pages 89-92. Cet excellent ouvrage a déjà été cité dans ce texte. Cité en page 53.

52 O. M. Bilaniuk & E. C. Sudarshan, Particles beyond the light barrier, *Physics Today* **22**, pp. 43–51, 1969, et O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande & E. C. G. Sudarshan, "Meta" relativity, *American Journal of Physics* **30**, pp. 718–723, 1962. Voyez aussi E. Recami, editor, *Tachyons, Monopoles and Related Topics*, North-Holland, Amsterdam, 1978. Cité en page 54.

53 J. P. Costella, B. H. J. McKellar, A. A. Rawlinson & G. J. Stephenson, The Thomas rotation, *American Journal of Physics* **69**, pp. 837–847, 2001. Cité en page 55.

54 Lisez par exemple S. S. Costa & G. E. A. Matsas, Temperature and relativity, preprint disponible sur http://arxiv.org/abs/gr-qc/9505045. Cité en page 55.

55 R. C. Tolman & G. N. Lewis, The principle of relativity and non-Newtonian mechanics, *Philosophical Magazine* **18**, pp. 510–523, 1909, et R. C. Tolman, Non-Newtonian mechanics : the mass of a moving body, *Philosophical Magazine* **23**, pp. 375–380, 1912. Cité en page 56.

56 S. Rainville, J. K. Thompson, E. G. Myers, J. M. Brown, M. S. Dewey, E. G. Kessler, R. D. Deslattes, H. G. Börner, M. Jentschel, P. Mutti & D. E. Pritchard, World year of physics : a direct test of $E = mc^2$, *Nature* **438**, pp. 1096–1097, 2005. Cité en page 61.

57 Cette information est issue d'une communication confidentielle de Frank DiFilippo. Une partie de cette histoire est contée dans F. DiFilippo, V. Natarajan, K. R. Boyce & D. E. Pritchard, Accurate atomic masses for fundamental metrology, *Physical Review Letters* **73**, pp. 1481–1484, 1994. Ces mesures furent réalisées à l'aide de pièges de Penning, un tour d'horizon des possibilités qu'ils offrent en est donné par R. C. Thompson, Precision measurement aspects of ion traps, *Measurement Science and Technology* **1**, pp. 93–105, 1990. Les expérimentateurs les plus importants dans le domaine de la lévitation d'une unique particule reçurent le prix Nobel en 1989. Une des conférences du Prix Nobel peut être consultée dans W. Paul, Electromagnetic traps for neutral and charged particles, *Reviews of Modern Physics* **62**, pp. 531–540, 1990. Cité en page 61.

58 J. L. Synge, *Relativity : The Special Theory*, North-Holland, 1956, pp. 208–213. Vous trouverez plus d'informations sur les antiparticules dans le cadre de la relativité restreinte dans J. P. Costella, B. H. J. McKellar & A. A. Rawlinson, Classical antiparticles, *American Journal of Physics* **65**, pp. 835–841, 1997. Voyez aussi Réf. 73. Cité en page 62.

59 A. Papapetrou, Drehimpuls- und Schwerpunktsatz in der relativistischen Mechanik, *Praktika Acad. Athenes* **14**, p. 540, 1939, et A. Papapetrou, Drehimpuls- und Schwerpunktsatz in der Diracschen Theorie, *Praktika Acad. Athenes* **15**, p. 404, 1940. Lisez également M. H. L. Pryce, The mass-centre in the restricted theory of relativity and its connexion with the quantum theory of elementary particles, *Proceedings of the Royal Society in London, A* **195**, pp. 62–81, 1948. Cité en page 64.

60 Les références qui ont précédé la formule d'Einstein $E = mc^2$ sont : Tolver Preston, *Physics of the Ether*, E. & F.N. Spon, 1875, J. H. Poincaré, La théorie de Lorentz et le principe de réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* **5**, pp. 252–278, 1900,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

O. De Pretto, Ipotesi dell'etere nella vita dell'universo, *Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* **tomo LXIII**, parte 2, pp. 439–500, Febbraio 1904, F. Hasenöhrl, *Berichte der Wiener Akademie* **113**, p. 1039, 1904, F. Hasenöhrl, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern, *Annalen der Physik* **15**, pp. 344–370, 1904, F. Hasenöhrl, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern – Berichtigung, *Annalen der Physik* **16**, pp. 589–592, 1905. Hasenöhrl décéda en 1915, De Pretto en 1921. Tous ces articles furent publiés avant le célèbre article d'Albert Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik* **18**, pp. 639–641, 1905. Cité en page 66.

61 La brochure suivante constitue un véritable bijou parmi tous les manuels de relativité restreinte : Ulrich E. Schröder, *Spezielle Relativitätstheorie*, Verlag Harri Deutsch, Thun, 1981. Cité aux pages 69 et 71.

62 Un article facile à lire montrant une photocopie d'une lettre d'Einstein éclaircissant ce point est le suivant : Lev B. Okun, The concept of mass, *Physics Today*, pp. 31–36, juin 1989. Ce sujet ne reste pas sans polémique, comme l'attestent les lettres des lecteurs accompagnant cet article. Vous pouvez les lire dans *Physics Today*, pp. 13–14 et pp. 115–117, mai 1990. Ce sujet demeure une source de débats. Cité en page 71.

63 Christian Møller, *The Theory of Relativity*, Clarendon Press, 1952, 1972. Cet ouvrage de référence a été traduit en plusieurs langues. Cité en page 71.

64 P. Ehrenfest, Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie, *Physikalische Zeitschrift* **10**, pp. 918–928, 1909. Ehrenfest suggéra (de manière incorrecte) que cela signifiait que la relativité ne pouvait pas être correcte. Une synthèse récente de ce problème peut être trouvée dans M. L. Ruggiero, The relative space : space measurements on a rotating platform, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0309020. Cité en page 72.

65 R. J. Low, When moving clocks run fast, *European Journal of Physics* **16**, pp. 228–229, 1995. Cité aux pages 77 et 78.

66 G. Stephenson & C. W. Kilmister, *Special Relativity for Physicists*, Longmans, London, 1965. Voyez également W. N. Matthews, Relativistic velocity and acceleration transformations from thought experiments, *American Journal of Physics* **73**, pp. 45–51, 2005. Cité en page 79.

67 L'impossibilité de définir des référentiels de coordonnées rigides pour des observateurs non uniformément accélérés est discutée par Charles Misner, Kip Thorne & John A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, p. 168, 1973. Cité en page 81.

68 E. A. Desloge & R. J. Philpott, Uniformly accelerated reference frames in special relativity, *American Journal of Physics* **55**, pp. 252–261, 1987. Cité en page 81.

69 R. H. Good, Uniformly accelerated reference frame and twin paradox, *American Journal of Physics* **50**, pp. 232–238, 1982. Cité aux pages 81, 82 et 86.

70 J. Dwayne Hamilton, The uniformly accelerated reference frame, *American Journal of Physics* **46**, pp. 83–89, 1978. Cité en page 82.

71 Le meilleur formulaire de mathématiques (également le moins cher) reste celui de K. Rottmann, *Mathematische Formelsammlung*, BI Hochschultaschenbücher, 1960. Cité en page 82.

72 C. G. Adler & R. W. Brehme, Relativistic solutions to a falling body in a uniform gravitation field, *American Journal of Physics* **59**, pp. 209–213, 1991. Cité en page 83.

73 Consultez par exemple les excellentes notes de cours de D. J. Raymond, A radically modern approach to freshman physics, sur le site http://www.physics.nmt.edu/~raymond/teaching.html. Cité aux pages 83 et 299.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

74 L. Mishra, The relativistic acceleration addition theorem, *Classical and Quantum Gravity* **11**, pp. L97–L102, 1994. Cité en page 83.

75 Edward A. Desloge, The gravitational red-shift in a uniform field, *American Journal of Physics* **58**, pp. 856–858, 1990. Cité en page 86.

76 Une de ces dernières expériences discutables se trouve dans T. P. Krisher, L. Maleki, G. F. Lutes, L. E. Primas, R. T. Logan, J. D. Anderson & C. M. Will, Test of the isotropy of the one-way speed of light using hydrogen-maser frequency standards, *Physical Review D* **42**, pp. 731–734, 1990. Cité en page 88.

77 Edwin F. Taylor & A. P. French, Limitation on proper length in special relativity, *American Journal of Physics* **51**, pp. 889–893, 1983. Cité en page 89.

78 Cette citation est tirée d'une lettre de Gibbs adressée à l'Académie américaine des arts et des sciences, dans laquelle il remercie l'Académie pour sa distinction. Cette lettre fut lue lors d'une session de l'Académie et fut donc intégrée dans ses comptes rendus : J. W. Gibbs, Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, **16**, p. 420, 1881. Cité en page 93.

79 Il semble que la première formulation de ce principe ait été publiée dans l'édition de l'an 2000 de ce texte, dans le chapitre sur la gravitation et la relativité. Le présent auteur découvrit le principe de la force maximale en 1998, alors qu'il recherchait une manière de dériver les résultats du chapitre **??** qui aurait été si élémentaire qu'elle aurait même convaincu un étudiant du second cycle. La référence est Christoph Schiller, *Motion Mountain – The Adventure of Physics*, situé sur www.motionmountain.eu. L'idée d'une force maximale a également été proposée par Gary Gibbons en 2002 (voir la référence ci-dessous). De nos jours, Gary Gibbons est plus réticent que l'auteur sur le fait de savoir si la force maximale peut être considérée comme un véritable principe physique (en dépit du titre de son article). L'approche d'une force maximale a été discutée dans différents groupes de discussion Usenet au début du vingt et unième siècle. Ce débat a montré que l'idée d'une force maximale (et d'une puissance maximale) était déjà familière à certains individus, mais que personne avant Gibbons et l'auteur ne l'avait couchée par écrit. Cette découverte aussi a été faite beaucoup trop tard. En résumé, seule l'idée d'ériger la force ou la puissance maximale au rang de *principe* semble être originale. Elle fut publiée pour la première fois dans la référence qui suit celle-ci puis dans C. Schiller, General relativity and cosmology derived from principle of maximum power or force, *International Journal of Theoretical Physics* **44**, pp. 1629–1647, 2005, preprint sur arxiv.org/abs/physics/0607090. Cité en page 93.

80 C. Schiller, Maximum force and minimum distance : physics in limit statements, qui constitue une partie de ce texte et téléchargeable sur www.motionmountain.eu/MotionMountain-Part6.pdf, preprint sur arxiv.org/abs/physics/0309118. Cité aux pages 95, 98, 110 et 119.

81 G. W. Gibbons, The maximum tension principle in general relativity, *Foundations of Physics* **32**, pp. 1891–1901, 2002, ou arxiv.org/abs/hep-th/0210109. Gary Gibbons explique que la force maximale découle de la relativité générale, il ne fait aucune déclaration concernant l'inverse. Cité en page 93.

82 H. C. Ohanian & R. Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., New York, 1994. Cité aux pages 98, 108, 110, 113 et 117.

83 Lisez par exemple Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001, p. 70 ff, ou Ray d'Inverno *Introducing Einstein's Relativity*, Clarendon Press, 1992, p. 36 ff. Cité en page 100.

84 Regardez par exemple A. Ashtekar, S. Fairhust & B. Krishnan, Isolated horizons : Hamiltonian evolution and the first law, arxiv.org/abs/gr-qc/0005083. Cité en page 100.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

85 T. Jacobson, Thermodynamics of spacetime : the Einstein equation of state, *Physical Review Letters* **75**, pp. 1260–1263, 1995 ou arxiv.org/abs/gr-qc/9504004. Cité en page 101.

86 Lisez par exemple Ekkehart Kröner, *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958, volume 5 de la série des « Ergebnisse der angewandten Mathematik ». Kröner montre la similitude qui existe entre les équations, les méthodes et les résultats de la physique des milieux continus de l'état solide et ceux de la relativité générale. Cité en page 104.

87 Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992. Cité en page 105.

88 Ce contre-exemple fut suggéré par Steve Carlip. Cité en page 108.

89 E. R. Caianiello, *Lettere al Nuovo Cimento* **41**, p. 370, 1984. Cité en page 110.

90 R. Penrose, Naked singularities, *Annals of the New York Academy of Sciences* **224**, pp. 125–134, 1973. Cité en page 116.

91 G. Huisken & T. Ilmanen, The Riemannian Penrose inequality, *International Mathematics Research Notices* **59**, pp. 1045–1058, 1997. Cité en page 116.

92 S. A. Hayward, Inequalities relating area, energy, surface gravity and charge of black holes, *Physical Review Letters* **81**, pp. 4557–4559, 1998. Cité en page 116.

93 C. Will, *Was Einstein Right ? – Putting General Relativity to the Test*, Oxford University Press, 1993. Consultez également son article arxiv.org/abs/gr-qc/9811036. Cité en page 117.

94 Les résultats des mesures réalisées par le satellite WMAP sont synthétisés sur le site map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html, les articles sont disponibles sur lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_bibliography.cfm. Cité en page 119.

95 La source historique la plus élémentaire est Albert Einstein, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* II pp. 844–846, 1915. C'est la première explication de la théorie générale de la relativité, en seulement trois pages. Cette théorie est alors expliquée plus en détail dans le célèbre article Albert Einstein, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik* **49**, pp. 769–822, 1916. Les références historiques peuvent être trouvées en allemand et en anglais dans John Stachel, ed., *The Collected Papers of Albert Einstein*, Volumes 1–9, Princeton University Press, 1987–2004.

Nous énumérons ci-dessous une sélection d'ouvrages en langue anglaise pour une étude plus approfondie, dans l'ordre croissant de profondeur et de difficulté :

— Le livre de poche de Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990, constitue un livre divertissant sans aucune formule, mais néanmoins exact et détaillé.
— Nous ne trouvons presque pas de formules, mais plein de perspicacité dans le texte enthousiaste de John A. Wheeler, *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman, 1990.
— Une excellente présentation didactique se trouve dans Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Exploring Black Holes : Introduction to General Relativity*, Addison Wesley Longman, 2000.
— Beauté, simplicité et concision sont les mots qui caractérisent l'ouvrage de Malcolm Ludvigsen, *General Relativity, a Geometric Approach*, Cambridge University Press, 1999.
— Une excellente explication fait la force de Bernard Schutz, *Gravity From the Ground Up*, Cambridge University Press, 2003.
— Un bon aperçu des expériences et de la théorie en est donné dans James Foster &

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

J. D. Nightingale, *A Short Course in General Relativity*, Springer Verlag, 2e édition, 1998.
— Un texte agréable : Sam Lilley, *Discovering Relativity for Yourself*, Cambridge University Press, 1981.
— Une version moderne en est donnée par Ray d'Inverno, *Introducing Einstein's Relativity*, Clarendon Press, 1992. Celle-ci intègre une description étendue des trous noirs et du rayonnement gravitationnel, et fait régulièrement référence aux recherches en cours.
— Pour un ouvrage magnifique, instructif et fortement recommandé, lisez Hans C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., 1994.
— Le livre suivant est bien écrit et particulièrement à jour, il met l'accent sur la théorie, il est écrit par l'un des grands maîtres de ce domaine : Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001.
— Un classique en est Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972.
— La passion pour la relativité générale transpire également dans John Klauder, ed., *Magic without Magic : John Archibald Wheeler – A Collection of Essays in Honour of His Sixtieth Birthday*, W.H. Freeman & Co., 1972.
— Pour un ouvrage complet, lisez Kip S. Thorne, *Black Holes and Time Warps – Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton, 1994.
— L'ouvrage le plus mathématique – et le plus difficile – reste celui de Robert M. Wald, *General Relativity*, University of Chicago Press, 1984.
— Une grande quantité d'informations concernant la relativité générale est disponible sur Internet. Pour un bon point de départ sur des ressources américaines, consultez le site math.ucr.edu/home/baez/physics/.

Il existe toujours un besoin pour un grand ouvrage moderne sur la relativité générale, avec des schémas en couleurs qui combinent les aspects expérimentaux et théoriques.

Pour des textes disponibles dans d'autres langues, lisez la référence suivante. Cité aux pages 123, 163, 165, 186 et 187.

96 Le classique G. Falk & W. Ruppel, *Mechanik, Relativität, Gravitation – ein Lehrbuch*, Springer Verlag, third edition, 1983, est un magnifique texte d'enseignement en allemand.

Un livret pratique et élégant : Ulrich E. Schröder, *Gravitation – Einführung in die allgemeine Relativitätstheorie*, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2001.

Une référence moderne en est Torsten Fliessbach, *Allgemeine Relativitätstheorie*, Akademischer Spektrum Verlag, 1998.

Celui-ci est excellent : Hubert Goenner, *Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Akademischer Spektrum Verlag, 1996.

En italien, il y a le magnifique, instructif, mais coûteux Hans C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitazione e spazio-tempo*, Zanichelli, 1997. Il est hautement recommandé. Une révision moderne de ce livre serait sans égale. Cité aux pages 123, 159, 160, 161, 163, 165, 186, 187 et 307.

97 P. Mohazzabi & J. H. Shea, High altitude free fall, *American Journal of Physics* **64**, pp. 1242–1246, 1996. En guise d'anecdote, à cause d'une défaillance technique Kittinger avait laissé sa main dans le vide (proche) au cours de son ascension, sans avoir encouru aucun dommage permanent. Sur les conséquences de l'exposition humaine au vide, consultez le site www.sff.net/people/geoffrey.landis/vacuum.html. Cité en page 124.

98 Ce récit est conté par exemple par W. G. Unruh, Time, gravity, and quantum mechanics, preprint disponible sur www.arxiv.org/abs/gr-qc/9312027. Cité en page 124.

99 H. Bondi, Gravitation, *European Journal of Physics* **14**, pp. 1–6, 1993. Cité en page 125.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

100 J. W. Brault, Princeton University, thèse de doctorat, 1962. Lisez aussi J. L. Snider, *Physical Review Letters* **28**, pp. 853–856, 1972, et pour l'étoile Sirius lisez J.L. Greenstein & al., *Astrophysical Journal* **169**, p. 563, 1971. Cité aux pages 127 et 268.

101 Ce célèbre article est R. V. Pound & G. A. Rebka, Apparent weight of photons, *Physical Review Letters* **4**, pp. 337–341, 1960. Une version plus précise en a été publiée par R. V. Pound & J. L. Snider, *Physical Review Letters* **13**, p. 539, 1964, et R. V. Pound & J. L. Snider, *Physical Review B* **140**, p. 788, 1965. Cité aux pages 127 et 268.

102 J. C. Hafele & Richard E. Keating, Around-the-world atomic clocks : predicted relativistic time gains, *Science* **177**, pp. 166–167, et Around-the-world atomic clocks : observed relativistic time gains, pp. 168–170, 14 juillet 1972. Cité en page 127.

103 R.F.C. Vessot & al., Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser, *Physical Review Letters* **45**, pp. 2081–2084, 1980. Cette expérience fut réalisée en 1976. Plus d'une douzaine de co-auteurs étaient impliqués dans ce travail, dans lequel on a tenté de projeter un maser dans l'espace avec un missile Scout jusqu'à une hauteur d'environ 10 000 km. Cité en page 127.

104 L. Briatore & S. Leschiutta, Evidence for Earth gravitational shift by direct atomic-time-scale comparison, *Il Nuovo Cimento* **37B**, pp. 219–231, 1977. Cité en page 127.

105 Vous trouverez plus d'informations sur les marées dans E. P. Clancy, *The Tides*, Doubleday, New York, 1969. Cité en page 129.

106 Ces expéditions se rendirent sur deux petites îles, à savoir à Sobral, au nord du Brésil, et à Príncipe, dans le golfe de Guinée. Les résultats de cette expédition parurent dans *The Times* avant qu'ils aient été diffusés dans une revue scientifique. Aujourd'hui, ce serait considéré comme une violation grossière de l'honnêteté scientifique. Les résultats furent publiés dans F. W. Dyson, A. S. Eddington & C. Davidson, *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)* **220A**, p. 291, 1920, et *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **62**, p. 291, 1920. Cité en page 130.

107 On trouve une excellente source d'images de l'espace-temps dans le texte de G. F. R. Ellis & R. Williams, *Flat and Curved Space-times*, Clarendon Press, Oxford, 1988. Cité en page 131.

108 J. Droste, Het veld van een enkel centrum in Einstein's theorie der zwaartekracht, en de beweging van een stoffelijk punt, *Verslag gew. Vergad. Wiss. Amsterdam* **25**, pp. 163–180, 1916. Cité en page 133.

109 L'expression *trou noir* fut introduite en 1967 lors d'une conférence sur les pulsars, comme le décrit John A. Wheeler, dans son autobiographie *Geons, Black Holes, and Quantum Foam : A Life in Physics*, W.W. Norton, 1998, pp. 296–297 : « Dans mon discours, j'ai proposé que nous devions considérer l'éventualité qu'au centre d'un pulsar puisse se trouver un objet gravitationnellement complètement effondré. J'ai fait remarquer que nous ne pouvions plus répéter sans cesse "objet gravitationnellement complètement effondré". Nous avions besoin d'une tournure descriptive plus brève. "Que pensez-vous de trou noir ?" interrogea quelqu'un dans l'auditoire. J'avais cherché le terme approprié pendant des mois, retournant sans cesse cette idée dans mon lit, dans la baignoire, dans ma voiture, à chaque fois que j'avais des périodes propices à la réflexion. Soudainement, ce nom semblait sonner parfaitement juste. Lorsque j'ai donné une conférence ... plus formelle ... quelques semaines plus tard, le 29 décembre 1967, j'ai employé cette expression, puis je l'ai intégrée dans la version écrite de cette conférence publiée au printemps 1968 ... Je décidai d'être plus relâché sur l'utilisation du terme "trou noir", l'abandonnant de mon cours et de la version écrite comme si c'était un vieil ami familier. Deviendrait-il populaire ? En réalité il le devint.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Aujourd'hui, chaque étudiant a entendu ce terme au moins une fois. »

L'usage répandu de cette expression commença avec l'article de R. Ruffini & J. A. Wheeler, Introducing the black hole, *Physics Today* **24**, pp. 30–41, janvier 1971.

Dans son autobiographie, Wheeler écrit également que l'expression « le trou noir n'a pas de cheveux » fut critiquée par Feynman qui la trouvait « obscène ». Un commentaire intéressant d'un physicien qui avait l'habitude de rédiger ses articles dans des bars où les serveuses travaillent les seins nus. Cité aux pages 133, 241, 242 et 248.

110 L. B. Kreuzer, Experimental measurement of the equivalence of active and passive gravitational mass, *Physical Review* **169**, pp. 1007–1012, 1968. Par le truchement d'une expérience astucieuse, il montra que les masses gravitationnelles du fluor et du brome sont identiques. Cité en page 134.

111 David Blair & Geoff McNamara, *Ripples on a cosmic sea*, Allen & Unwin, 1997, constitue un excellent livre accessible à tous sur ce sujet. Cité en page 134.

112 G. W. Gibbons, The maximum tension principle in general relativity, *Foundations of Physics* **32**, pp. 1891–1901, 2002, ou arxiv.org/abs/hep-th/0210109. Cité en page 135.

113 Le fait que les corps chutent le long de géodésiques, indépendamment de leur masse, ce que nous appelons le principe d'équivalence faible, a été testé par de nombreuses expériences jusqu'à une précision de 10^{-13}. L'expérience la plus précise utilise des balances de torsion. Regardez, par exemple, le site Web du groupe de Eőt-Wash sur www.npl.washington.edu/eotwash/experiments/experiments.html. Cité en page 138.

114 Jusqu'à présent, les expériences confirment que les énergies électrostatique et nucléaire (forte) chutent comme la matière à une partie pour 10^8 près, et l'énergie (nucléaire) faible à quelques pour cent près. Cela est résumé dans la Réf. 118. Cité en page 139.

115 J. Soldner, *Berliner Astronomisches Jahrbuch auf das Jahr 1804*, 1801, p. 161. Cité en page 139.

116 Lisez par exemple K. D. Olum, Superluminal travel requires negative energies, *Physical Review Letters* **81**, pp. 3567–3570, 1998, ou M. Alcubierre, The warp drive : hyper-fast travel within general relativity, *Classical and Quantum Gravity* **11**, pp. L73–L77, 1994. Lisez aussi Chris Van Den Broeck, A warp drive with more reasonable total energy requirements, *Classical and Quantum Gravity* **16**, pp. 3973–3979, 1999. Cité en page 142.

117 Lisez l'*Astronomical Almanac*, et son *Explanatory Supplement*, H.M. Printing Office, London and U.S. Government Printing Office, Washington, 1992. Concernant l'information à propos des diverses coordonnées de temps utilisées dans le monde, tel que le temps coordonnée barycentrique, le temps situé au barycentre du Système solaire, consultez également la page Web tycho.usno.navy.mil/systime.html. Elle contient de plus une excellente bibliographie. Cité en page 143.

118 Un tour d'horizon en est donné dans C. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, chapitre 14.3, Cambridge University Press, édition corrigée, 1993. (Bien qu'il représente une source de référence, son point de vue sur le rôle des marées et sur le rôle de l'énergie gravitationnelle dans le principe d'équivalence a été critiqué par d'autres chercheurs.) Lisez aussi C. Will, *Was Einstein Right ? – Putting General Relativity to the Test*, Oxford University Press, 1993. Regardez aussi son article sur arxiv.org/abs/gr-qc/9811036. Cité aux pages 144, 163 et 305.

119 Ces calculs négligent plusieurs effets plus minuscules, comme la rotation de la Terre et le décalage vers le rouge. Pour l'effet principal, lisez Edwin F. Taylor, « The boundaries of nature : special and general relativity and quantum mechanics, a second course in physics » – Edwin F. Taylor's acceptance speech for the 1998 Oersted Medal presented by the American

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Association of Physics Teachers, 6 janvier 1998, *American Journal of Physics* **66**, pp. 369–376, 1998. Cité en page 144.

120 A. G. Lindh, Did Popper solve Hume's problem ?, *Nature* **366**, pp. 105–106, 11 novembre 1993, Cité en page 144.

121 P. Kaaret, S. Piraino, P. F. Bloser, E. C. Ford, J. E. Grindlay, A. Santangelo, A. P. Smale & W. Zhang, Strong Field Gravity and X-Ray Observations of 4U1820-30, *Astrophysical Journal* **520**, pp. L37–L40, 1999, ou sur arxiv.org/abs/astro-ph/9905236. Certains graphiques magnifiques situés sur le site Web research.physics.uiuc.edu/CTA/movies/spm exhibent les modèles de ce système stellaire. Cité en page 145.

122 R. J. Nemiroff, Visual distortions near a black hole and a neutron star, *American Journal of Physics* **61**, pp. 619–632, 1993. Cité en page 145.

123 Cette équivalence fut testée avec précision pour la première fois par R. von Eőtvős, *Annalen der Physik & Chemie* **59**, p. 354, 1896, et par R. von Eőtvős, V. Pekár, E. Fekete, Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität, *Annalen der Physik 4, Leipzig* **68**, pp. 11–66, 1922. Eőtvős releva des accords à 5 parties pour 10^9. D'autres expériences furent réalisées par P. G. Roll, R. Krotkow & R. H. Dicke, The equivalence of inertial and passive gravitational mass, *Annals of Physics (NY)* **26**, pp. 442–517, 1964, un des articles de recherche les plus intéressants et divertissants en physique expérimentale, et par V. B. Braginsky & V. I. Panov, *Soviet Physics – JETP* **34**, pp. 463–466, 1971. Des résultats modernes, avec des erreurs inférieures à une partie pour 10^{12}, sont donnés par Y. Su & al., New tests of the universality of free fall, *Physical Review* **D50**, pp. 3614–3636, 1994. Plusieurs expériences ont été proposées pour tester l'équivalence dans l'espace jusqu'à moins d'une partie pour 10^{16}. Cité aux pages 145, 146 et 268.

124 L'effet Thirring fut prédit dans H. Thirring, Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Physikalische Zeitschrift* **19**, pp. 33–39, 1918, et dans H. Thirring, Berichtigung zu meiner Arbeit : « Über die Wirkung rotierender Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie », *Physikalische Zeitschrift* **22**, p. 29, 1921. L'effet Thirring–Lense fut prédit dans J. Lense & H. Thirring, Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Physikalische Zeitschrift* **19**, pp. 156–163, 1918. Lisez aussi la Réf. 145. Cité en page 149.

125 Cette prouesse, qui a tiré profit des satellites LAGEOS et LAGEOS II, est contée dans Ignazio Ciufolini, The 1995–99 measurements of the Thirring–Lense effect using laser-ranged satellites, *Classical and Quantum Gravity* **17**, pp. 2369–2380, 2000. Lisez également I. Ciufolini & E. C. Pavlis, A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense–Thirring effect, *Nature* **431**, pp. 958–960, 2004. Cité aux pages 150, 154 et 268.

126 La détection de l'effet Thirring–Lense dans les pulsars binaires est présentée dans R. D. Blandford, Lense–Thirring precession of radio pulsars, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **16**, pp. 191–206, 1995. Cité en page 150.

127 G. Holzmüller, *Zeitschrift für Mathematik und Physik* **15**, p. 69, 1870, F. Tisserand, *Comptes Rendus* **75**, p. 760, 1872, et *Comptes Rendus* **110**, p. 313, 1890. Cité en page 150.

128 B. Mashhoon, Gravitoelectromagnetism, www.arxiv.org/abs/gr-qc/0011014. Consultez également sa vaste liste de références sur le gravitomagnétisme. Cité en page 151.

129 D. Bedford & P. Krumm, On relativistic gravitation, *American Journal of Physics* **53**, pp. 889–890, 1985, et P. Krumm & D. Bedford, The gravitational Poynting vector and energy transfer, *American Journal of Physics* **55**, pp. 362–363, 1987. Cité aux pages 152 et 159.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

130 M. Kramer & al., Tests of general relativity from timing the double pulsar, preprint sur www.arxiv.org/abs/astro-ph/0609417. Cité aux pages 154 et 268.

131 Cette histoire est relatée dans John A. Wheeler, *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman, 1990. Cité en page 155.

132 Lisez, par exemple, K. T. McDonald, Answer to question #49. Why c for gravitational waves ?, *American Journal of Physics* **65**, pp. 591–592, 1997, et la section III de V. B. Braginsky, C. M. Caves & K. S. Thorne, Laboratory experiments to test relativistic gravity, *Physical Review D* **15**, pp. 2047–2068, 1992. Cité en page 156.

133 A. Tartaglia & M. L. Ruggiero, Gravito-electromagnetism versus electromagnetism, *European Journal of Physics* **25**, pp. 203–210, 2004. Cité en page 156.

134 La revendication originale est de S. M. Kopeikin, The post-Newtonian treatment of the VLBI experiment on September 8, 2002, *Physics Letters A* **312**, pp. 147–157, 2003, ou arxiv.org/abs/gr-qc/0212121. Des arguments allant à l'encontre de cette prétention furent publiés, entre autres, par Stuart Samuel, On the speed of gravity and the v/c corrections to the Shapiro time delay, arxiv.org/abs/astro-ph/0304006. Cité aux pages 157 et 162.

135 La formule du quadrupôle est expliquée dans le texte de Goenner. Lisez la Réf. 96. Cité en page 159.

136 Pour une introduction aux ondes gravitationnelles, lisez B. F. Schutz, Gravitational waves on the back of an envelope, *American Journal of Physics* **52**, pp. 412–419, 1984. Cité en page 157.

137 La magnifique synthèse de Daniel Kleppner, The gem of general relativity, *Physics Today* **46**, pp. 9–11, avril 1993, parut six mois avant que les auteurs du travail cité, Joseph Taylor et Russel Hulse, reçoivent le prix Nobel pour la découverte des pulsars milliseconde. Un article de revue plus détaillé se trouve dans J. H. Taylor, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* **341**, pp. 117–134, 1992. L'article original est J. H. Taylor & J. M. Weisberg, Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16, *Astrophysical Journal* **345**, pp. 434–450, 1989. Regardez aussi J. M. Weisberg, J. H. Taylor & L. A. Fowler, Pulsar PSR 1913+16 sendet Gravitationswellen, *Spektrum der Wissenschaft*, pp. 53–61, décembre 1981. Cité aux pages 160 et 161.

138 D. R. Lorimer, Binary and millisecond pulsars, in www.livingreviews.org/lrr-2005-7, et J. M. Weisberg & J. H. Taylor, The relativistic binary pulsar B1913+16 : thirty years of observations and analysis, pp. 25–31, dans F. A. Rasio & I. H. Stairs, editors, *Binary Radio Pulsars*, Proceedings of a meeting held at the Aspen Center for Physics, USA, 12 janvier - 16 janvier 2004, volume 328 of ASP Conference Series, Astronomical Society of the Pacific, 2005. Cité en page 161.

139 W. B. Bonnor & M. S. Piper, The gravitational wave rocket, *Classical and Quantum Gravity* **14**, pp. 2895–2904, 1997, ou arxiv.org/abs/gr-qc/9702005. Cité en page 161.

140 L. Lerner, A simple calculation of the deflection of light in a Schwarzschild gravitational field, *American Journal of Physics* **65**, pp. 1194–1196, 1997. Cité en page 162.

141 A. Einstein, Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, *Annalen der Physik* **35**, p. 898, 1911. Cité en page 163.

142 I.I. Shapiro & al., Fourth test of general relativity, *Physical Review Letters* **13**, pp. 789–792, 1964. Cité en page 164.

143 I.I. Shapiro & al., Fourth test of general relativity : preliminary results, *Physical Review Letters* **20**, pp. 1265–1269, 1968. Cité en page 164.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

144 J. H. Taylor, Pulsar timing and relativistic gravity, *Proceedings of the Royal Society, London A* **341**, pp. 117–134, 1992. Cité aux pages 164 et 167.

145 W. de Sitter, On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **77**, pp. 155–184, p. 418E, 1916. Pour une discussion sur la précession de de Sitter et la précession de Thirring–Lense, lisez aussi B. R. Holstein, Gyroscope precession in general relativity, *American Journal of Physics* **69**, pp. 1248–1256, 2001. Cité aux pages 168 et 306.

146 B. Bertotti, I. Ciufolini & P. L. Bender, New test of general relativity : measurement of de Sitter geodetic precession rate for lunar perigee, *Physical Review Letters* **58**, pp. 1062–1065, 1987. Il fut confirmé plus tard par I.I. Shapiro & al., Measurement of the de Sitter precession of the moon : a relativistic three body effect, *Physical Review Letters* **61**, pp. 2643–2646, 1988. Cité aux pages 168 et 268.

147 Wolfgang Rindler, *Essential Relativity*, Springer, seconde édition revisée, 1977. Cité en page 171.

148 Cela est expliqué (sans donner la solution de l'énigme) à la p. 67, de Wolfgang Pauli, *Relativitätstheorie*, Springer Verlag, Berlin, 2000, l'édition réimprimée d'un célèbre texte initialement publié en 1921. La référence est H. Vermeil, Notiz über das mittlere Krümmungsmaß einer n-fach ausgedehnten Riemannschen Mannigfalktigkeit, *Göttinger Nachrichten, mathematische–physikalische Klasse* p. 334, 1917. Cité en page 171.

149 M. Santander, L. M. Nieto & N. A. Cordero, A curvature based derivation of the Schwarzschild metric, *American Journal of Physics* **65**, pp. 1200–1209, 1997. Cité aux pages 175 et 177.

150 Michael H. Soffel, *Relativity in Astronomy, Celestial Mechanics and Geodesy*, Springer Verlag, 1989. Cité en page 175.

151 Richard P. Feynman, Fernando B. Morinigo, William G. Wagner & Brian Hatfield, *Feynman Lectures on Gravitation*, Westview Press, 1995. Cité en page 176.

152 C. G. Torre & I. M. Anderson, Symmetries of the Einstein equations, *Physical Review Letters* **70**, pp. 3525–3529, 1993, ou www.arxiv.org/abs/gr-qc/9302033. Cité en page 182.

153 H. Nicolai, Gravitational billiards, dualities and hidden symmetries, www.arxiv.org/abs/gr-qc/0506031. Cité en page 182.

154 Y. Wang & M. Tegmark, New dark energy constraints from supernovae, microwave background and galaxy clustering, *Physical Review Letters* **92**, p. 241302, 2004, ou arxiv.org/astro-ph/0403292. Cité en page 183.

155 Des arguments prônant la stérilité de la covariance générale en sont donnés par John D. Norton, General covariance and the foundations of general relativity, *Reports on Progress in Physics* **56**, pp. 791–858, 1993. L'opinion opposée, incluant la discussion des « éléments absolus », est tenue dans l'ouvrage de J. L. Anderson, *Principles of Relativity Physics*, chapitre 4, Academic Press, 1967. Cité en page 184.

156 Pour une bonne introduction à la physique mathématique, lisez le célèbre texte en deux volumes de ces trois femmes Yvonne Choquet-Bruhat, Cecile DeWitt-Morette & Margaret Dillard-Bleick, *Analysis, Manifolds, and Physics*, North-Holland, 1996 et 2001. La première édition de ce classique est parue en 1977. Cité en page 185.

157 Lisez par exemple R.A. Knop & al., New constraints on Ω_M, Ω_Λ, and w from an independent set of eleven high-redshift supernovae observed with HST, *Astrophysical Journal* **598**, pp. 102–137, 2003. Cité en page 186.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

158 R. P. Feynman, R. B. Leighton & M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, 1977, volume II, p. 42–14. Cité en page 188.

159 L'article R. J. Hughes, The equivalence principle, *Contemporary Physics* **4**, pp. 177–191, 1993, est un aperçu récent des tests expérimentaux de l'universalité de la chute libre. Cité en page 189.

160 Consultez par exemple H. L. Bray, Black holes, geometric flows, and the Penrose inequality in general relativity, *Notices of the AMS* **49**, pp. 1372–1381, 2002. Cité en page 190.

161 Lisez par exemple l'article de K. Dalton, Gravity, geometry and equivalence, preprint qui peut être trouvé sur arxiv.org/abs/gr-qc/9601004, et L. Landau & E. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields*, Pergamon, 4th edition, 1975, p. 241. Cité en page 191.

162 Ekkehart Kröner, *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958. Kröner montre comment utiliser le formalisme de Ricci dans la physique de l'état solide. Cité en page 192.

163 Les analogues du trou noir apparaissent en acoustique, dans les fluides et plusieurs autres domaines. Cité en page 192.

164 L'équivalence entre les diverses définitions du tenseur de Riemann est expliquée dans ...Cité en page 194.

165 K. Tangen, Could the Pioneer anomaly have a gravitational origin ?, arxiv.org/abs/gr-qc/0602089. Cité en page 195.

166 H. Dittus & C. Lämmerzahl, Die Pioneer-Anomalie, *Physik Journal* **5**, pp. 25–31, janvier 2006. Cité en page 195.

167 Cette célèbre citation est la première phrase du dernier chapitre, le « Beschluß », d' Emmanuel Kant, *Kritik der praktischen Vernunft*, 1797. Cité en page 196.

168 Aetius, Opinions, III, I, 6. Lisez Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 445. Cité en page 196.

169 Une admirable introduction à l'astronomie moderne a été donnée par Paolo Maffei, *I mostri del cielo*, Mondadori Editore, 1976. Cité en page 200.

170 Lisez par exemple A. N. Cox, ed., *Allen's Astrophysical Quantities*, AIP Press and Springer Verlag, 2000. Un aperçu des observations dans le domaine optique en est donné par le Sloan Digital Sky Survey sur cas.sdss.org/dr7/en/. Nous pouvons trouver plus de précisions concernant l'Univers dans le magnifique ouvrage de W. J. Kaufmann & R. A. Fredman, *Universe*, fifth edition, W.H. Freeman & Co., 1999. Les découvertes les plus récentes sont mieux retracées sur les sites Web sci.esa.int et hubble.nasa.gov. Cité en page 201.

171 P. Jetzer, Gravitational microlensing, *Naturwissenschaften* **86**, pp. 201–211, 1999. Des mesures utilisant les vitesses orbitales autour de la Galaxie sont en bon accord avec cette valeur. Cité aux pages 198 et 202.

172 D. R. Lorimer, A. J. Faulkner, A. G. Lyne, R. N. Manchester, M. Kramer, M. A. McLaughlin, G. Hobbs, A. Possenti, I. H. Stairs, F. Camilo, M. Burgay, N. D'Amico, A. Corongiu & F. Crawford, The Parkes multibeam pulsar survey : VI. Discovery and timing of 142 pulsars and a Galactic population analysis, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* preprint sur arxiv.org/abs/astro-ph/0607640. Cité en page 202.

173 D. Figer, An upper limit to the masses of stars, *Nature* **434**, pp. 192–194, 2005. Cité en page 202.

174 G. Basri, The discovery of brown dwarfs, *Scientific American* **282**, pp. 77–83, avril 2001. Cité en page 202.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

175 P. M. Woods & C. Thompson, Soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars : magnetar candidates, arxiv.org/abs/astro-ph/0406133. Cité en page 203.

176 B. M. Gaensler, N. M. McClure-Griffiths, M. S. Oey, M. Haverkorn, J. M. Dickey & A. J. Green, A stellar wind bubble coincident with the anomalous X-ray pulsar 1E 1048.1-5937 : are magnetars formed from massive progenitors ?, *The Astrophysical Journal (Letters)* **620**, pp. L95–L98, 2005, ou arxiv.org/abs/astro-ph/0501563. Cité en page 203.

177 Une idée opposée est défendue par ... Cité en page 207.

178 C. Wirtz, *Scientia* **38**, p. 303, 1925, et K. Lundmark, The motions and the distances of the spiral nebulae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **85**, pp. 865–894, 1925. Lisez aussi G. Stromberg, Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae, *Astrophysical Journal* **61**, pp. 353–362, 1925. Cité en page 207.

179 G. Gamow, The origin of the elements and the separation of galaxies, *Physical Review* **74**, p. 505, 1948. Cité en page 208.

180 A. G. Doroshkevich & I. D. Novikov, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **154**, p. 809, 1964. Il parut dans une traduction anglaise quelques mois plus tard. L'histoire de cette prédiction fut contée par Penzias lors de sa conférence Nobel. Cité en page 208.

181 Arno A. Penzias & Robert W. Wilson, A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mcs, *Astrophysical Journal* **142**, pp. 419–421, 1965. Cité en page 208.

182 Macrobius, *Somnium Scipionis*, XIV, 19. Lisez Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 61. Cité en page 210.

183 Sur l'histoire lointaine de l'Univers, lisez les excellents textes de G. Börner, *The Early Universe – Facts & Fiction*, Springer Verlag, 3rd edition, 1993, ou Barry Parker, *Creation – The Story of the Origin and the Evolution of the Universe*, Plenum Press, 1988. Un admirable ouvrage de vulgarisation est celui de M. Longair, *Our Evolving Universe*, Cambridge University Press, 1996. Cité en page 210.

184 Les premières traces d'oxygène semblent être apparues dans l'atmosphère il y a 2,32 milliards d'années, vraisemblablement produites par des micro-organismes. Compulsez A. Becker & al., Dating the rise of atmospheric oxygen, *Nature* **427**, pp. 117–120, 2003. Cité en page 211.

185 Gabriele Walker, *Snowball Earth – The Story of the Great Global Catastrophe That Spawned Life as We Know It*, Crown Publishing, 2003. Cité en page 212.

186 K. Knie, Spuren einer Sternexplosion, *Physik in unserer Zeit* **36**, p. 8, 2005. On peut trouver la première étape de cette connexion dans K. Knie, G. Korschinek, T. Faestermann, E. A. Dorfi, G. Rugel & A. Wallner, ^{60}Fe anomaly in a deep-sea manganese crust and implications for a nearby supernova source, *Physics Review Letters* **93**, p. 171103, 2004, la deuxième étape dans N. D. Marsh & H. Svensmark, Low cloud properties influenced by cosmic rays, *Physics Review Letters* **85**, pp. 5004–5007, 2000, et la troisième étape dans de Menocal, Plio-Pleistocene African climate, *Science* **270**, pp. 53–59, 1995. Cité en page 213.

187 A. Friedman, Über die Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik* **10**, pp. 377–386, 1922, et A. Friedmann, Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik* **21**, pp. 326–332, 1924. (Dans la transcription latine, le nom de l'auteur acquiert un second « n » dans son deuxième article.) Cité en page 214.

188 H. Knutsen, Darkness at night, *European Journal of Physics* **18**, pp. 295–302, 1997. Cité aux pages 219 et 220.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

189 Lisez par exemple P.D. Pešić, Brightness at night, *American Journal of Physics* **66**, pp. 1013–1015, 1998. Cité aux pages 220 et 221.

190 Paul Wesson, Olbers' paradox and the spectral intensity of extra-galactic background light, *Astrophysical Journal* **367**, p. 399, 1991. Cité en page 220.

191 Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley, 1972. Un splendide ouvrage rédigé avec une forte touche personnelle et insistant principalement sur toutes les relations qu'il y a avec les données expérimentales. Il ne développe pas une profonde perception de la courbure de l'espace-temps, et ne mentionne pas les problèmes fondamentaux de l'espace et du temps en relativité générale. Excellent pour apprendre comment calculer effectivement les choses, mais moins pour les objectifs de notre ascension montagneuse. Cité aux pages 220 et 259.

192 Les recherches de supernovae sont dirigées par de nombreux groupes de recherche avec les plus grands télescopes optiques et X. ...Cité en page 221.

193 Ces expériences sont discutées en détail dans l'excellent exposé de D. Giulini & N. Straumann, Das Rätsel der kosmischen Vakuumenergiedichte und die beschleunigte Expansion des Universums, *Physikalische Blätter* **556**, pp. 41–48, 2000. Regardez aussi N. Straumann, The mystery of the cosmic vacuum energy density and the accelerated expansion of the universe, *European Journal of Physics* **20**, pp. 419–427, 1999. Cité aux pages 221 et 270.

194 A. Harvey & E. Schucking, Einstein's mistake and the cosmological contant, *American Journal of Physics* **68**, pp. 723–727, 2000. Cité en page 222.

195 L'auteur de la Bible explique la *pluie* de cette manière, comme nous pouvons le déduire de ses toutes premières pages, Genèse 1 : 6-7. Cité en page 223.

196 Jusqu'à sa mort, Fred Hoyle défendit sa conception de l'Univers statique, par exemple dans G. Burbidge, F. Hoyle & J. V. Narlikar, A different approach to cosmology, *Physics Today* **52**, pp. 38–44, 1999. Cette équipe a également écrit un livre sous le même titre, publié en 2000 par Cambridge University Press. Cité aux pages 223 et 224.

197 Stephen W. Hawking & G. F. R. Ellis, *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, Cambridge, 1973. Entre autres, ce texte de référence discute des singularités de l'espace-temps et de leur nécessité dans l'histoire de l'Univers. Cité aux pages 224, 261 et 314.

198 Saint Augustin, *Les Confessions*, 398, écrit : « Et je réponds à cette demande : "Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ?" Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : "Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères". Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule. [...] Que si avant le ciel et la terre il n'était point de temps, pourquoi demander ce que vous [Dieu] faisiez ALORS ? Car, où le TEMPS n'était pas, ALORS ne pouvait être. » (Livre onzième, chapitres 12 et 13). Cité en page 225.

199 Stephen Hawking, *A Brief History of Time – From the Big Bang to Black Holes*, 1988. C'est presque une obligation pour chaque physicien d'avoir lu ce best-seller, puisqu'il constitue un sujet de discussion récurrent lors de dîners festifs. Cité en page 225.

200 Les détails sur les étoiles sont exposés dans de nombreux ouvrages. Lisez par exemple ...Cité en page 228.

201 J. Pelt, R. Kayser, S. Refsdal & T. Schramm, The light curve and the time delay of QSO 0957+561, *Astronomy and Astrophysics* **305**, p. 97, 1996. Cité en page 230.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

202 F. Zwicky, Nebulae as gravitational lenses, *Physical Review Letters* **51**, p. 290, et F. Zwicky, On the probability to detect nebulae which act as gravitational lenses, p. 679, 1937. Le point de vue pessimiste d'Einstein se trouve dans A. Einstein, Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field, *Science* **84**, pp. 506–507, 1936. Une revue de détail sur l'effet de lentille gravitationnelle peut même être trouvée en ligne, dans l'article de J. Wambsganss, Gravitational lensing in astronomy, *Living Reviews in Relativity* **1-12**, pp. 1–80, 1998, situé sur le site www.livingreviews.org/Articles/Volume1/1998-12wamb.

Il y a également le livre de P. Schneider, J. Ehlers & E. E. Falco, *Gravitational Lenses*, Springer Verlag, Berlin, 1992. Cité en page 230.

203 M. Lachièze-Rey & J.-P. Luminet, Cosmic topology, *Physics Reports* **254**, pp. 135–214, 1995. Lisez aussi B. F. Roukema, The topology of the universe, preprint arxiv.org/abs/astro-ph/0010185. Cité en page 232.

204 Merci à Steve Carlip d'avoir éclairci ce point. Cité en page 232.

205 G. F. R. Ellis & T. Rothmann, Lost horizons, *American Journal of Physics* **61**, pp. 883–893, 1993. Cité en page 233.

206 A. Guth, *Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts – Die Theorie des inflationären Universums*, Droemer Knaur, 1999. Cité en page 233.

207 Les valeurs possibles pour l'entropie de l'Univers ont été discutées par Ilya Prigogine, *Is Future Given ?*, World Scientific, 2003. Ce fut son dernier livre. Pour une approche différente, voyez G. A. Mena Marugán & S. Carneiro, Holography and the large number hypothesis, arxiv.org/abs/gr-qc/0111034. Cet article réexprime également la déclaration souvent formulée sur le fait que l'Univers possède une entropie qui est beaucoup plus petite que le maximum théorique. Ce maximum est communément estimé autour de $10^{120}\,k$, alors qu'on « estime » que la valeur réelle vaut $10^{100}\,k$. Cependant, d'autres auteurs citent $10^{84}\,k$. En 1974, Roger Penrose fit également des conjectures concernant l'entropie de l'Univers. Cité en page 234.

Défi 399 pe

208 C. L. Bennet, M. S. Turner & M. White, The cosmic rosetta stone, *Physics Today* **50**, pp. 32–38, novembre 1997. Le fond diffus de rayonnement cosmologique se distingue du rayonnement de corps noir par moins de 0,005 %. Cité en page 236.

209 L'absence d'expansion dans le Système solaire est indiquée dans ... Cité en page 236.

210 Un admirable article expliquant comment nous pouvons réaliser des expériences qui permettent de révéler la manière dont le corps humain perçoit la rotation même lorsque les yeux sont bandés et les oreilles bouchées se trouve dans M.-L. Mittelstaedt & H. Mittelstaedt, The effect of centrifugal force on the perception of rotation about a vertical axis, *Naturwissenschaften* **84**, pp. 366–369, 1997. Cité en page 237.

211 L'indépendance de l'inertie a été testée ... Cité en page 237.

212 L'état actuel des connaissances en est donné dans les comptes rendus de conférence de Julian Barbour & Herbert Pfister, eds., *Mach's Principle : From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Birkhäuser, 1995. Diverses formulations du principe de Mach – en réalité, 21 toutes différentes – sont comparées en page 530.

Dans un développement qui n'est pas sans rapport, Dennis Sciama publia, en 1953,un article dans lequel il argumente que l'inertie d'une particule est due à l'attraction gravitationnelle de toute la matière restante, présente dans l'Univers. Cet article est largement cité, mais ne fait aucune déclaration nouvelle sur ce problème. Lisez D. W. Sciama, On the origin of inertia, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **113**, pp. 34–42, 1953. Cité aux pages 237 et 238.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

213 Des précisions sur la rotation de l'Univers sont données dans A. Kogut, G. Hinshaw & A. J. Banday, Limits to global rotation and shear from the COBE DMR four-year sky maps, *Physical Review D* **55**, pp. 1901–1905, 1997. On trouve une information plus ancienne dans J. D. Barrow, R. Juszkiewicz & D. H. Sonoda, Universal rotation : how large can it be ?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **213**, pp. 917–943, 1985. Lisez aussi J. D. Barrow, R. Juszkiewicz & D. H. Sonoda, Structure of the cosmic microwave background, *Nature* **309**, pp. 397–402, 1983, ou E. F. Bunn, P. G. Fereira & J. Silk, How anisotropic is the universe ?, *Physical Review Letters* **77**, pp. 2883–2886, 1996. Cité en page 238.

214 Ce sujet a été discuté dans le cadre de la gravité linéarisée (approximation des champs faibles) par Richard Tolman, dans son manuel *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*, Clarendon Press, 1934, aux pp. 272–290. Le problème a été exactement résolu par A. Peres, Null electromagnetic fields in general relativity theory, *Physical Review* **118**, pp. 1105–1110, 1960, et par W. B. Bonnor, The gravitational field of light, *Commun. Math. Phys.* **13**, pp. 163–174, 1969. Regardez également N. V. Mitskievic & K. K. Kumaradtya, The gravitational field of a spinning pencil of light, *Journal of Mathematical Physics* **30**, pp. 1095–1099, 1989, et P. C. Aichelburg & R. U. Sexl, On the gravitational field of a spinning particle, *General Relativity and Gravitation* **2**, pp. 303–312, 1971. Cité en page 239.

215 Lisez le plaisant récit de vulgarisation d' Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990. Les conséquences de la désintégration de la lumière furent étudiées par M. Bronstein, Die Ausdehnung des Weltalls, *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* **3**, pp. 73–82, 1933. Cité aux pages 239 et 245.

216 C. L. Carilli, K. M. Menten, J. T. Stocke, E. Perlman, R. Vermeulen, F. Briggs, A. G. de Bruyn, J. Conway & C. P. Moore, Astronomical constraints on the cosmic evolution of the fine structure constant and possible quantum dimensions, *Physical Review Letters* **85**, pp. 5511–5514, 25 décembre 2000. Cité en page 239.

217 Les observations sur les trous noirs situés au centre des galaxies et ailleurs sont résumées par R. Blandford & N. Gehrels, Revisiting the black hole, *Physics Today* **52**, pp. 40–46, juin 1999. Cité aux pages 241 et 255.

218 Le livre de poche suivant constitue un excellent ouvrage divertissant sur les trous noirs, dépourvu de formules, mais néanmoins précis et détaillé : Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990. Consultez aussi Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Exploring Black Holes : Introduction to General Relativity*, Addison Wesley Longman 2000.

Pour une introduction historique, lisez l'article de R. Ruffini, The physics of gravitationally collapsed objects, pp. 59–118, dans *Neutron Stars, Black Holes and Binary X-Ray Sources*, Proceedings of the Annual Meeting, San Francisco, Calif., 28 février 1974, Reidel Publishing, 1975. Cité en page 241.

219 J. Michell, On the means of discovering the distance, magnitude, etc of the fixed stars, *Philosophical Transactions of the Royal Society London* **74**, p. 35, 1784, réimprimé dans S. Detweiler, *Black Holes – Selected Reprints*, American Association of Physics Teachers, 1982. Cité en page 241.

220 Cet article admirable est de R. Oppenheimer & H. Snyder, On continued gravitational contraction, *Physical Review* **56**, pp. 455–459, 1939. Cité en page 243.

221 R. P. Kerr, Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics, *Physical Review Letters* **11**, pp. 237–238, 1963. Cité en page 247.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

222 E. T. Newman, E. Couch, R. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash & R. Torrence, Metric of a rotating, charged mass, *Journal of Mathematical Physics* **6**, pp. 918–919, 1965. Cité en page 247.

223 Pour une synthèse, lisez P. O. Mazur, Black hole uniqueness theorems, pp. 130–157, dans M. A. H. MacCallum, editor, *General Relativity and Gravitation*, Cambridge University Press, 1987, ou la mise à jour sur arxiv.org/abs/hep-th/0101012. Regardez aussi D. C. Robinson, Four decades of black hole uniqueness theorems, disponible sur www.mth.kcl.ac.uk/staff/dc_robinson/blackholes.pdf. Cité en page 248.

224 H. P. Künzle & A. K. M. Masood-ul-Alam, Spherically symmetric static SU(2) Einstein-Yang-Mills fields, *Journal of Mathematical Physics* **31**, pp. 928–935, 1990. Cité en page 248.

225 Pour des informations sur la tendance du rayonnement gravitationnel à produire des formes sphériques, lisez par exemple ... Cité en page 248.

226 R. Penrose & R. M. Floyd, Extraction of rotational energy from a black hole, *Nature* **229**, pp. 177–179, 1971. Cité en page 249.

227 La relation masse–énergie pour un trou noir en rotation est due à D. Christodoulou, Reversible and irreversible transformations in black hole physics, *Physical Review Letters* **25**, pp. 1596–1597, 1970. Pour un trou noir général, chargé et en rotation, elle est due à D. Christodoulou & R. Ruffini, Reversible transformations of a charged black hole, *Physical Review D* **4**, pp. 3552–3555, 1971. Cité en page 250.

228 J. D. Bekenstein, Black holes and entropy, *Physical Review* **D7**, pp. 2333–2346, 1973. Cité en page 251.

229 Ce paradoxe est traité dans M. A. Abramowicz, Black holes and the centrifugal force paradox, *Scientific American* **266**, pp. 74–81, mars 1993, et dans le commentaire qu'en donne Don N. Page, Relative alternatives, *Scientific American* **266**, p. 5, août 1993. Lisez aussi M. A. Abramowicz & E. Szuszkiewicz, The wall of death, *American Journal of Physics* **61**, pp. 982–991, 1993, et M. A. Abramowicz & J. P. Lasota, On traveling round without feeling it and uncurving curves, *American Journal of Physics* **54**, pp. 936–939, 1986. Cité en page 253.

230 Pour des précisions concernant les trous noirs dans l'Univers primordial, lisez ... Cité en page 254.

231 Pour des précisions concernant la formation des trous noirs par effondrement stellaire, lisez ... Cité en page 255.

232 Frederick Lamb, APS meeting 1998 press conference : Binary star 4U1820-30, 20 000 light years from Earth, *Physics News Update*, 27 avril 1998. Cité en page 255.

233 Le premier témoignage direct de matière chutant dans un trou noir fut annoncé au début de l'an 2001 ... Cité en page 255.

234 Pour lire un résumé accessible sur les théorèmes de singularité de Penrose–Hawking, regardez ... Des détails peuvent être trouvés dans la Réf. 197. Cité en page 256.

235 Pour un tour d'horizon de la censure cosmique, consultez T. P. Singh, Gravitational collapse, black holes and naked singularities, arxiv.org/abs/gr-qc/9805066, ou R. M. Wald, Gravitational collapse and cosmic censorship, arxiv.org/abs/gr-qc/9710068. L'idée originale est due à R. Penrose, Gravitational collapse : the role of general relativity, *Rivista del Nuovo Cimento* **1**, pp. 252–276, 1969. Cité en page 256.

236 G. J. Stoney, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* **11**, pp. 381–391, 1881. Cité en page 260.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

237 L'horloge géométrodynamique est discutée dans D. E. Brahm & R. P. Gruber, Limitations of the geometrodynamic clock, *General Relativity and Gravitation* **24**, pp. 297–303, 1992. L'horloge fut elle-même introduite par R. F. Marzke, dans sa thèse de doctorat *The theory of measurement in general relativity*, 1959, avec John Wheeler comme directeur de thèse. Cité en page 261.

238 R. Geroch, Einstein algebras, *Commun. Math. Phys.* **26**, pp. 271–275, 1972. Cité en page 261.

239 A. Macdonald, Einstein's hole argument, *American Journal of Physics* **69**, pp. 223–225, 2001. Cité en page 262.

240 Roman U. Sexl, Die Hohlwelttheorie, *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht* **368**, pp. 453–460, 1983. Roman U. Sexl, Universal conventionalism and space-time, *General Relativity and Gravitation* **1**, pp. 159–180, 1970. Lisez aussi Roman U. Sexl, Die Hohlwelttheorie, dans Arthur Scharmann & Herbert Schramm, editors, *Physik, Theorie, Experiment, Geschichte, Didaktik – Festschrift für Wilfried Kuhn zum 60. Geburtstag am 6. Mai 1983*, Aulis Verlag Deubner, 1984, pp. 241–258. Cité en page 263.

241 T. Damour, Experimental tests of relativistic gravity, arxiv.org/abs/gr-qc/9904057. C'est son dernier article d'une série de publications sur ce thème, le premier étant T. Damour, Was Einstein 100 % right ?, arxiv.org/abs/gr-qc/9412064. Cité aux pages 267, 268 et 269.

242 H. Dittus, F. Everitt, C. Lämmerzahl & G. Schäfer, Die Gravitation im Test, *Physikalische Blätter* **55**, pp. 39–46, 1999. Cité aux pages 267 et 268.

243 Consultez S. Bässler & al., Improved test of the equivalence principle for gravitational selfenergy, *Physical Review Letters* **83**, pp. 3585–3588, 1999. Lisez également C. M. Will, Gravitational radiation and the validity of general relativity, *Physics Today* **52**, p. 38, octobre 1999. Cité en page 268.

244 La dépendance en l'inverse du carré a été testée jusqu'à une précision de 60 µm, comme le rapportent E. Adelberger, B. Heckel & C. D. Hoyle, Testing the gravitational inverse-square law, *Physics World* **18**, pp. 41–45, 2005. Cité en page 268.

245 Pour des théories concurrentes de la relativité générale, lisez par exemple C. M. Will, The confrontation between general relativity and experiment, *Living Reviews of Relativity* 2001, www.livingreviews.org/lrr-2001-4. Par exemple, l'absence de l'effet Nordtvedt, une hypothétique oscillation d'une période de 28 jours dans la distance Terre–Lune, qui fut recherchée par des expériences fondées sur des lasers sans donner un quelconque résultat positif, « tua » dans l'œuf plusieurs théories concurrentes. Cet effet, prédit par Kenneth Nordtvedt, n'apparaîtrait que si l'énergie gravitationnelle présente dans le système Terre–Lune chutait d'une manière différente de la Terre et la Lune elles-mêmes. Pour un résumé des mesures relevées, lisez J. Müller, M. Schneider, M. Soffel & H. Ruder, *Astrophysical Journal Letters* **382**, p. L101, 1991. Cité en page 268.

246 Pratiquement tout ce qu'il est important de savoir en relativité générale est publié dans la revue *Classical and Quantum Gravity*. Cité en page 269.

247 Collisions et problèmes à plusieurs corps ... Cité en page 269.

248 Inflation et Univers primordial ... Cité en page 269.

249 L'étude du chaos dans les équations du champ d'Einstein en est juste à ses balbutiements. Lisez par exemple L. Bombelli, F. Lombardo & M. Castagnino, Chaos in Robertson-Walker cosmology, www.arxiv.org/abs/gr-qc/9707051. Cité en page 269.

250 Le satellite de l'ESA baptisé « Planck » mesurera la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde. Cité en page 269.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

251 Une bonne introduction au domaine des sursauts gamma en est donnée par S. Klose, J. Greiner & D. Hartmann, Kosmische Gammastrahlenausbrüche – Beobachtungen und Modelle, Teil I und II, *Sterne und Weltraum* mars et avril 2001. Cité en page 270.

252 La base de données des solutions du champ est construite autour des travaux de A. Karlhede. Elle nous permet de faire la distinction entre des solutions tout en restreignant la quantité de calculs mathématiques nécessaires. Cité en page 270.

253 La torsion est présentée dans R. T. Hammond, New fields in general relativity, *Contemporary Physics* **36**, pp. 103–114, 1995. Cité en page 271.

254 Trous de ver et topologies non triviales ...On peut en trouver une approche élémentaire dans T. Diemer & M. Hadley, Charge and the topology of spacetime, *Classical and Quantum Gravity* **16**, pp. 3567–3577, 1999, ou www.arxiv.org/abs/gr-qc/9905069 et M. Hadley, Spin half in classical general relativity, *Classical and Quantum Gravity* **17**, pp. 4187–4194, 2000, ou www.arxiv.org/abs/gr-qc/0004029. Cité en page 270.

255 Voici une importante formulation de la relativité : A. Ashtekar, New variables for classical and quantum gravity, *Physical Review Letters* **57**, pp. 2244–2247, 1986. Cité en page 270.

256 Un livre magnifiquement rédigé sur les connexions qui existent entre le Big Bang et la physique des particules est celui de I. L. Rozental, *Big Bang – Big Bounce, How Particles and Fields Drive Cosmic Evolution*, Springer, 1988. Pour d'autres corrélations, lisez M. Nagano & A. A. Watson, Observations and implications of the ultrahigh energy cosmic rays, *Reviews of Modern Physics* **72**, pp. 689–732, 2000. Cité en page 270.

257 L'enseignement bénéficiera en particulier de nouvelles formulations, d'une focalisation sur les principes et leurs conséquences, comme cela s'est produit pour la relativité restreinte, de descriptions plus élémentaires dans le domaine des champs faibles, et de recherches ultérieures sur la théorie de la relativité générale. Les récents ouvrages cités ci-dessus vont tous dans ce sens. Cité en page 270.

258 G. E. Prince & M. Jerie, Generalising Raychaudhuri's equation, in *Differential Geometry and Its Applications*, Proc. Conf., Opava (Czech Republic), 27-31 août 2001, Silesian University, Opava, 2001, pp. 235–242. Cité en page 271.

259 L'approche de Bekenstein en est une qui est notoire : il proposa une modification de la relativité générale qui corrige l'attraction universelle en $1/r^2$ aux distances galactiques. Cela a été réalisé dans le but d'expliquer les centaines de mesures des courbes de rotation galactique qui semblent exiger une telle modification. (Cette approche est dénommée théorie *MOND* pour *dynamique newtonienne modifiée.*) Une introduction en est donnée par Jacob D. Bekenstein, The modified Newtonian dynamics – MOND – and its implications for new physics, *Contemporary Physics* **47**, pp. 387–403, 2006, preprint sur www.arXiv.org/abs/astro-ph/0701848v2. Cité en page 271.

260 Le Système International d'Unités, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités du SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par ce même organisme. Preuve du lent cheminement d'une vieille institution, le BIPM inaugura son site Web en 1998 seulement, il est dorénavant accessible sur www.bipm.fr. Consultez également la page Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, elle présente les biographies des personnes qui ont donné leur nom aux diverses unités employées. Le site de son homologue britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est nettement mieux : il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités du SI. Cité en page 274.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

261 La bible dans le domaine de la mesure du temps est représentée par l'œuvre magistrale en deux volumes de J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte-rendu populaire se trouve dans Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes employés dans cette discipline. Sur les mesures de longueur, voir ... Sur les mesures de précision du courant électrique, voir ... Sur les mesures de masse, notamment atomique, voir la page 61. Sur les mesures de haute précision de la température, voir la page 345. Cité en page 275.

262 Les préfixes non officiels furent proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et devraient se généraliser à l'avenir. Cité en page 276.

263 Pour plus d'informations sur les systèmes d'unités électromagnétiques, consultez le livre de référence de John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3ème édition, Wiley, 1998. Cité en page 279.

264 G. J. Stoney, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* **11**, pp. 381–391, 1881. Cité en page 279.

265 D.J. Bird & al., Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies, *Physical Review Letters* **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cité en page 280.

266 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures, *Physical Review Letters* **70**, pp. 2818–2821, 1993. Lisez également son article dans *Scientific American*, janvier 1994. Cité en page 280.

267 G. Charpak & R. L. Garwin, The DARI, *Europhysics News* **33**, pp. 14–17, janvier/février 2002. Cité en page 280.

268 Les valeurs mesurées des quantités physiques et les plages de valeurs qu'elles prennent sont assemblées dans Horst Völz & Peter Ackermann, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Cité en page 281.

269 Lisez par exemple K. Codling & L. J. Frasinski, Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields, *Contemporary Physics* **35**, pp. 243–255, 1994. Cité en page 282.

270 A. Zeilinger, The Planck stroll, *American Journal of Physics* **58**, p. 103, 1990. Pouvez-vous découvrir un autre exemple similaire ? Cité en page 282.

Défi 400 e

271 L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge à fontaine atomique au césium, avait une précision d'une partie pour 10^{15}. Une précision plus élevée a été prévue comme étant bientôt possible, entre autres par M. Takamoto, F. -L. Hong, R. Higashi & H. Katori, An optical lattice clock, *Nature* **435**, pp. 321–324, 2005. Cité en page 283.

272 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité en page 283.

273 Consultez les informations sur les mésons $D_s^{\pm}$, données par le « particle data group » sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité en page 284.

274 Au sujet de la longue durée de vie du tantale 180, lisez D. Belic & al., Photoactivation of $^{180}Ta^{m}$ and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope, *Physical Review Letters* **83**, pp. 5242–5245, 20 décembre 1999. Cité en page 284.

275 Consultez l'étude donnée par L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, The detection of gravitational waves, *Reports on Progress in Physics* **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cité en page 284.

276 Lisez l'article clair et approfondi de G. E. Stedman, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* **60**, pp. 615–688, 1997. Cité en page 284.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

277 D'après une communication privée de Richard Rusby, c'est la valeur de 1997, alors qu'elle était estimée à 99.975°C en 1989, comme l'indiquent Gareth Jones & Richard Rusby, Official : water boils at 99.975°C, *Physics World* **2**, pp. 23–24, septembre 1989, et R. L. Rusby, Ironing out the standard scale, *Nature* **338**, p. 1169, mars 1989. Pour plus d'informations sur les mesures de température, lisez la page 345. Cité en page 284.

278 J. Short, Newton's apples fall from grace, *New Scientist*, **2098**, p. 5, 6 septembre 1997. Vous trouverez plus de détails dans R. G. Keesing, The history of Newton's apple tree, *Contemporary Physics* **39**, pp. 377–391, 1998. Cité en page 285.

279 Ces divers concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, l'ISO 5725, dont la désignation est *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*. Une excellente introduction en est donnée par John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis : the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité en page 286.

280 P. J. Mohr & B. N. Taylor, CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 1998, *Reviews of Modern Physics* **59**, p. 351, 2000. C'est la compilation des constantes résultant d'un ajustement international et recommandée pour l'usage international par le Comité de données pour la Science et la Technologie (CODATA), un membre du Conseil international pour la science, lequel compte également l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) et d'autres organisations. Le site Web de l'UICPA est www.iupac.org. Cité aux pages 286 et 287.

281 Les détails sont fournis dans la célèbre référence astronomique, Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité en page 291.

282 Pour plus d'informations concernant le nombre π, ainsi que d'autres constantes, la page Web oldweb.cecm.sfu.ca/pi/pi.html donne une grande quantité de données et de références. Elle possède également un lien vers la synthèse qui en est faite sur mathworld.wolfram.com/Pi.html et vers de nombreux autres sites sur ce sujet. Voici quelques formules simples sur π :

$$\pi + 3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\,2^n}{\binom{2n}{n}} \tag{297}$$

ou l'élégante formule découverte en 1996 par Bailey, Borwein et Plouffe :

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n}\left(\frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6}\right). \tag{298}$$

Ce site développe aussi les nouvelles méthodes découvertes pour pouvoir calculer des chiffres binaires, choisis au préalable, de π sans avoir à évaluer tous les précédents. En outre, le nombre de chiffres (consécutifs) connus en 1999 était de plus de 1,2 million de millions, tel que le cite *Science News* **162**, p. 255, 14 décembre 2002. Ces méthodes passent avec succès tous les tests aléatoires, comme l'explique le site Web mathworld.wolfram.com/PiDigits.html. Cependant, cette propriété, désignée *normalité*, n'a jamais reçu de démonstration, c'est la plus grande question qui demeure ouverte au sujet de π. Il est probable que la théorie de la dynamique du chaos conduise vers une solution à cette énigme dans les années à venir.

Une autre méthode permettant de calculer π ainsi que d'autres constantes a été découverte et publiée par D. V. Chudnovsky & G. V. Chudnovsky, The computation of classical constants, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* **86**, pp. 8178–8182, 1989. Les frères Chudnowsky avaient mis au point un supercalculateur dans l'appartement de Gregory avec environ 70 000 euros, et détinrent pendant plusieurs années le record du

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

calcul du plus grand nombre de chiffres de π. Ils engagèrent une rude compétition durant plusieurs décennies avec Kanada Yasumasa, qui a battu le record en 2000, en effectuant le calcul sur un supercalculateur de l'industrie. De nouvelles formules pour calculer π sont toujours occasionnellement découvertes.

Pour le calcul de la constante d'Euler γ lisez aussi D. W. DeTemple, A quicker convergence to Euler's constant, *The Mathematical Intelligencer*, pp. 468–470, mai 1993.

Remarquez que nous en savons peu concernant les propriétés élémentaires de certains nombres, par exemple nous ne savons toujours pas si $\pi + e$ est un nombre rationnel ou pas ! (On pense qu'il ne l'est pas.) Voulez-vous devenir un mathématicien ? Cité en page 292.

Défi 401 r

Défi 402 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS

Challenge 2, page 15: Un cône ou un hyperboloïde paraît également droit dans toutes les directions, à condition que le positionnement soit bon. Nous n'avons donc pas uniquement besoin de tourner l'objet, mais également de le déplacer. La meilleure méthode pour vérifier la planéité consiste à utiliser l'interférence entre un rayon lumineux cohérent entrant et partant. Si les franges d'interférence sont droites, la surface est plane. (Comment vous assurez-vous que le front d'onde du faisceau lumineux est plan ?)

Challenge 3, page 16: Une fraction de l'infini, c'est toujours l'infini.

Challenge 4, page 17: L'instant où le satellite Io pénètre dans l'ombre lors de la deuxième mesure se produit environ 1 000 s plus tard que prévu, par rapport à la première mesure. Puisque la Terre est éloignée d'environ $3 \cdot 10^{11}$ m de Jupiter et Io, nous retrouvons la valeur classique de la vitesse de la lumière.

Challenge 5, page 18: Pour compenser l'aberration, le télescope doit être incliné *dans* la direction du mouvement de la Terre, et pour compenser la parallaxe, dans la direction *opposée* au mouvement.

Challenge 6, page 18: Sinon la somme des vitesses serait supérieure à c.

Challenge 7, page 18: Le dessin le montre. L'observateur, la Lune et le Soleil forment un triangle. Lorsque la Lune est à demi pleine, l'angle formé par celle-ci est un angle droit. Donc le rapport des distances peut être déterminé, quoique non facilement, car l'angle au niveau de l'observateur est très proche également d'un angle droit.

Challenge 8, page 18: Des réflecteurs ont été déposés sur la Lune au cours des missions Apollo et Lunokhod. Ils sont utilisés pour réfléchir des impulsions de lumière laser de 35 ps envoyés dessus par des télescopes. Le chronométrage du voyage aller–retour donne alors la distance à la Lune. Bien sûr, la distance absolue n'est pas connue avec une haute précision, mais les variations le sont. L'épaisseur de l'atmosphère constitue la plus grande source d'erreur. Consultez les sites www.csr.utexas.edu/mlrs et ilrs.gsfc.nasa.gov.

Challenge 9, page 19: Fizeau utilisa un miroir situé à environ 8,6 km. Comme l'indique la figure, il avait juste à compter les dents de sa roue dentée et à mesurer sa vitesse de rotation entre le moment où la lumière partait dans une direction en passant par une dent et celui où elle revenait par la suivante.

Challenge 10, page 20: Ce temps doit être plus court que $T = l/c$, autrement dit plus court que 30 ps. C'était un obturateur *gazeux*, et non pas un solide. Il était déclenché par une impulsion de lumière rouge (indiquée sur la photographie) synchronisée par l'impulsion devant être photographiée. Pour certains matériaux, tel le gaz utilisé, une lumière forte peut conduire à un blanchissement, de telle façon qu'ils deviennent transparents. Pour plus de détails concernant cet obturateur et sa technique de déclenchement perfectionnée, lisez l'article des auteurs.

Challenge 11, page 20: Prenez simplement une photographie d'un éclair tout en déplaçant l'appareil photo horizontalement. Vous verrez qu'un éclair est composé de plusieurs décharges. Tout

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

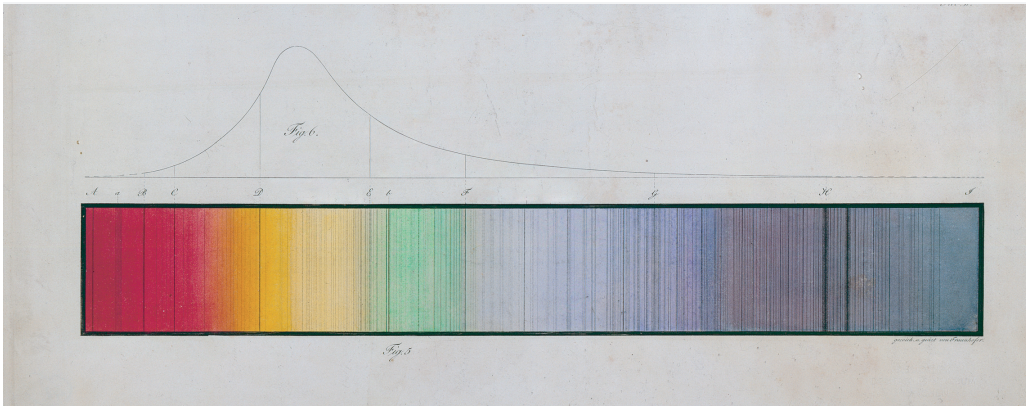


FIGURE 98 Les raies originales publiées par Fraunhofer. (© Fraunhofer Gesellschaft)

cela montre qu'il est beaucoup plus lent que la lumière.

Si l'éclair se déplaçait quasiment aussi vite que la lumière elle-même, l'effet Doppler changerait sa couleur en fonction de l'angle auquel nous l'observons, le long de sa direction de mouvement. Un éclair proche changerait de couleur du sommet à sa base.

Challenge 12, page 21: Les ampoules les plus rapides étaient des particules subatomiques, telles que les muons, qui se désintègrent en émettant un photon, donc un minuscule flash lumineux. Toutefois, certaines étoiles émettent aussi des jets rapides de matière, qui se déplacent avec des vitesses comparables à celle de la lumière.

Challenge 13, page 21: La vitesse des neutrinos est la même que celle de la lumière à 9 décimales près, puisqu'on a observé que des neutrinos et de la lumière arrivent ensemble, à 12 secondes d'intervalle l'un de l'autre, après un voyage de 170 000 années-lumière d'une explosion de supernova.

Réf. 28

Challenge 15, page 24: Nous en débattons de la meilleure façon en montrant que les autres possibilités n'ont aucun sens.

Challenge 16, page 25: La coordonnée spatiale de l'événement où la lumière est réfléchie est $c(k^2-1)T/2$, la coordonnée de temps est $(k^2+1)T/2$. Leur rapport doit être v. Le résultat est donné en résolvant pour k.

Challenge 18, page 26: Le mouvement des ondes radio, du rayonnement infrarouge, ultraviolet et gamma ne peut également être arrêté. Nous avions suspecté dans le passé le neutrino, mais finalement on s'est aperçu qu'il a une masse et peut donc en principe être arrêté. Le mouvement de la gravité ne peut également pas être arrêté.

Challenge 20, page 28: $\lambda_R/\lambda_S = \gamma$.

Challenge 21, page 28: Pour passer de la lumière rouge (650 nm) à la lumière verte (550 nm), il faut une vitesse $v = 0,166c$.

Challenge 22, page 29: Les scientifiques mesurent le décalage des raies spectrales, tel le décalage de ce que nous appelons la raie Lyman-α de l'hydrogène, qui est émise (ou absorbée) lorsqu'un électron libre est capturé (ou éjecté) par un proton. C'est une des célèbres raies de Fraunhofer.

Page ??

Challenge 23, page 29: Les vitesses sont données par

$$v/c = \frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1} \tag{299}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ce qui implique que $v(z = -0,1) = 31\,\mathrm{Mm/s} = 0,1c$ *en direction* de l'observateur et que $v(z = 5) = 284\,\mathrm{Mm/s} = 0,95c$ *en s'éloignant* de l'observateur.

Un décalage vers le rouge de 6 implique une vitesse de $0,96c$; de telles vitesses apparaissent parce que, comme nous le verrons dans la section sur la relativité générale, les objets lointains s'éloignent de nous. Des décalages vers le rouge élevés sont observés uniquement pour des objets qui sont extrêmement éloignés de la Terre, et plus ils sont éloignés plus ils s'éloignent vite. Pour un décalage vers le rouge de 6, cela représente une distance de plusieurs milliards d'années-lumière.

Challenge 24, page 29: Aucun effet Doppler n'est perçu pour un observateur distant au repos par rapport à l'objet massif. Dans d'autres situations, il y a évidemment un effet Doppler, mais il n'est pas engendré par la déviation.

Challenge 25, page 29: La vitesse du son n'est pas invariante par rapport à la vitesse des observateurs. Par conséquent, l'effet Doppler pour le son confirme même – aux différences de mesures près – que le temps est *identique* pour des observateurs se déplaçant l'un par rapport à l'autre.

Challenge 28, page 31: À l'intérieur des tubes de téléviseurs couleurs (ils utilisent des tensions plus élevées que ceux en noir et blanc), les électrons sont décrits par $v/c \approx \sqrt{2 \cdot 30/511}$ ou $v \approx 0,3c$.

Challenge 29, page 31: Si vous pouvez imaginer cela, publiez-le. Les lecteurs seraient enchantés de découvrir cette histoire.

Challenge 31, page 32: Les relations entre l'invariance par rapport à l'observateur et la propriété de vitesse limite semblent être valides en général dans la nature, comme indiqué dans la section **??** Cependant, un argument définitif et achevé n'est pas encore à portée de main. Si vous en avez un, publiez-le !

Page ??

Challenge 34, page 34: Si la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, aucun observateur ne peut prétendre être plus au repos qu'un autre (tant que l'espace-temps reste plat), parce qu'il n'existe aucune observation issue de l'électrodynamique, de la mécanique ou de tout autre domaine de la physique qui permette de faire cette affirmation.

Challenge 37, page 36: Le fait de redessiner la Figure 9 de la page 25 pour l'autre observateur permet de conclure.

Challenge 38, page 36: La valeur anthropique est atteinte dans les accélérateurs de particules, la valeur de la nature se trouve dans les rayons cosmiques de plus forte énergie.

Challenge 39, page 38: L'ensemble des événements se comporte comme une variété, parce qu'il se comporte comme un espace quadridimensionnel : il possède une infinité de points autour de n'importe quel point de départ donné, et les distances se comportent de manière familière, les limites se comportent de la manière usuelle. Il se distingue par une dimension supplémentaire, et par le signe dans la définition de la distance : ainsi, à proprement parler, c'est une variété riemannienne.

Challenge 40, page 38: L'infini est évident, comme l'est l'ouverture. Donc l'équivalence topologique peut être montrée en imaginant que la variété est constituée de caoutchouc et est enveloppée autour d'une sphère.

Challenge 41, page 40: Le cône de lumière demeure inchangé, donc la causalité aussi.

Challenge 42, page 40: Dans une telle situation, la division de l'espace-temps autour d'un observateur inertiel entre le futur, le passé et l'ailleurs ne se tiendrait plus, et le futur pourrait influencer le passé (comme le ferait remarquer un autre observateur).

Challenge 45, page 43: Le rapport prévu par un raisonnement naïf est de $(1/2)^{(6,4/2,2)} = 0,13$.

Challenge 46, page 43: Le facteur de dilatation du temps pour $v = 0,9952c$ est 10,2, ce qui donne un temps propre de 0,62 µs. Donc le rapport prédit par la relativité restreinte est de $(1/2)^{(0,62/2,2)} = 0,82$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 47, page 44: Envoyez un signal lumineux de la première horloge jusqu'à la seconde, et qui revient à la première. Prenez le temps moyen entre le départ et l'arrivée, puis comparez-le avec le temps lors de la réflexion. Répétez cela plusieurs fois. Regardez aussi la Figure 9.

Challenge 50, page 45: Astuce : pensez à différentes directions de visée.

Challenge 51, page 45: Pas avec les méthodes expérimentales actuelles.

Challenge 53, page 46: Indice : soyez prudents avec la définition de la « rigidité ».

Challenge 55, page 46: Quand la pièce glissante qui s'éloigne traverse le décrochement, l'ampoule ne peut pas rester allumée, quelle que soit la vitesse, si cette pièce glissante est plus courte que le décrochement. C'est étrange à première vue, car la pièce n'allume pas l'ampoule même à des vitesses élevées, alors que dans le référentiel de la pièce il y a un contact aux deux extrémités. La raison est que, dans cette situation, il n'y a pas assez de temps pour envoyer le signal à la batterie que le contact est fait, de telle façon que le courant ne peut pas commencer à s'écouler.

Supposez que le courant s'écoule à une vitesse u, qui est de l'ordre de c. Alors, comme l'a montré Dirk Van de Moortel, la lampe s'éteindra si la longueur de la pièce glissante l_{glisseur} et la longueur du décrochement $l_{\text{décro.}}$ vérifient $l_{\text{glisseur}}/l_{\text{décro.}} < \gamma(u+v)/u$. Consultez également la référence citée.

Pour une pièce glissante s'approchant du décrochement et de l'ampoule, la situation est différente : une pièce plus courte que le décrochement *peut* laisser la lampe allumée tout le temps, comme le souligna S.R. Madhu Rao.

Pourquoi les débats sont-ils souvent houleux ? Certaines personnes prétendront (faussement) que ce problème n'est pas physique, d'autres diront que les équations de Maxwell sont nécessaires. D'autres encore affirmeront que ce problème est absurde parce que, pour des longueurs supérieures de la pièce glissante, la réponse allumé/éteint dépend de la valeur précise de la vitesse. Pourtant, c'est vraiment le cas dans cette situation.

Challenge 56, page 47: Oui, la corde cède. Dans des véhicules accélérés, la distance varie, comme indiqué plus loin dans ce texte.

Challenge 57, page 47: Le sous-marin coulera. Le sous-marin rapide sera même plus lourd, car son énergie cinétique s'ajoute à son poids. L'effet de contraction pourrait le rendre plus léger, comme le maintient le capitaine, mais d'une quantité plus petite. Le poids total – en considérant la direction vers le haut comme étant le sens positif – est donné par $F = -mg(\gamma - 1/\gamma)$.

Challenge 58, page 47: Un sous-marin relativiste fondrait instantanément à cause du frottement avec l'eau. Sinon, il s'envolerait loin de la planète car il se déplace plus vite que la vitesse de libération. Et il produirait d'autres catastrophes.

Challenge 59, page 50: Cette question confond l'observation de la contraction de Lorentz avec sa mesure. Un collier de perles relativiste devient plus court, mais ce raccourcissement peut seulement être mesuré, et pas photographié. Les tailles mesurées des perles correspondent à des ellipsoïdes aplatis aux vitesses relativistes. Le collier observé ressemble à des sphères qui se recouvrent partiellement.

Challenge 63, page 50: Oui, le vieillissement dans une vallée est ralenti par rapport aux sommets montagneux. Cependant, la sensation propre du temps ne s'en trouve pas affectée. On ne connaît pas la raison de l'apparition des cheveux gris. Si la synchronisation est génétique, le temps propre où cela se produit est le même dans les deux emplacements.

Challenge 64, page 51: Il n'existe aucune manière de placer un observateur aux points spécifiés. La vitesse propre peut être définie uniquement pour des observateurs, c'est-à-dire pour des entités qui peuvent transporter une horloge. Ce n'est pas le cas pour des images.

Challenge 65, page 52: Utilisez simplement la géométrie élémentaire pour montrer cela.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 66, page 52: De façon plus intéressante, l'horizon peut aisément se déplacer plus vite que la lumière, si vous bougez la tête de manière appropriée, comme le peut l'extrémité de l'arc-en-ciel.

Challenge 69, page 56: La relativité rend les arguments du défi 130 irréfutables.

Challenge 74, page 59: La collision du bas dans la Figure 33 montre directement ce résultat, grâce à la conservation de l'énergie. Pour la collision du haut, cette conséquence se tient également, si nous partons de la conservation de la quantité de mouvement $\gamma mv = \Gamma MV$ et de la conservation de l'énergie $(\gamma + 1)m = \Gamma M$.

Challenge 76, page 60: L'annihilation de la matière et de l'antimatière.

Challenge 83, page 64: Tournez simplement la partie gauche de la Figure 36 un petit peu dans le sens anti-horaire.

Challenge 84, page 65: Dans les collisions entre des charges relativistes, une partie de l'énergie est rayonnée vers l'extérieur sous forme de lumière, de telle façon que les particules perdent effectivement de l'énergie.

Challenge 85, page 66: Probablement pas, puisque toutes les relations entre les quantités physiques sont désormais connues. Toutefois, vous pourriez le vérifier vous-même : on ne sait jamais. Il est digne de mentionner que la force maximale dans la nature fut découverte (dans ce texte) après être demeurée cachée pendant plus de 80 ans.

Challenge 86, page 68: Exprimez les quadrivecteurs U' et U puis extrayez-en v' comme une fonction de v et la vitesse de coordonnée relative V. Faites alors un changement de variable.

Challenge 87, page 68: Tout mouvement se produisant à la vitesse de la lumière.

Challenge 88, page 69: $b^0 = 0$, $b^i = \gamma^2 a_i$.

Challenge 91, page 70: Pour des particules ultra-relativistes, comme pour des particules sans masse, nous avons $E = pc$.

Challenge 92, page 71: Indice : évaluez P_1 et P_2 dans le référentiel inertiel pour une particule.

Challenge 93, page 71: Utilisez la définition $\mathbf{f} = \mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}t$ et la relation $\mathbf{KU} = 0 = \mathbf{fv} - \mathrm{d}E/\mathrm{d}t$ valables pour des forces qui préservent la masse inertielle.

Challenge ??, page **??**: Oui, nous pouvons voir un tel objet : l'effet projecteur et l'effet Doppler n'engendrent pas l'invisibilité. Cependant, une partie de cet objet, à savoir la région qui tourne en s'éloignant de l'observateur, peut devenir très sombre.

Challenge 121, page 82: L'énergie contenue dans le carburant doit être comparable à la masse au repos de la moto, multipliée par c^2. Puisque le carburant possède une masse beaucoup plus importante que l'énergie, cela soulève un problème insurmontable.

Challenge 123, page 83: L'accélération constante et la gravité sont similaires dans leurs effets, comme nous le discuterons dans la section sur la relativité générale.

Challenge 129, page 85: Oui, c'est vrai.

Challenge 130, page 85: Il est plat, comme un plan.

Challenge 132, page 86: Oui, néanmoins cet effet est très petit et dépend de la position du Soleil. En réalité, ce qui est blanc à une hauteur donnée n'est pas blanc à une autre.

Challenge 134, page 87: Localement, la lumière se déplace toujours à la vitesse c.

Challenge 135, page 87: En s'éloignant de la Terre, g décroît. Il est effectivement nul au terme d'une distance suffisante.

Challenge 136, page 88: La lumière est nécessaire pour déterminer la distance *et* pour synchroniser des horloges, donc il n'y a aucun moyen de mesurer la vitesse de la lumière d'un point à un autre seulement. Le mouvement inverse nécessite d'être pris en compte. Cependant, certaines

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

affirmations sur la vitesse à sens unique de la lumière peuvent toujours être faites (regardez math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SR/experiments.html). Toutes les expériences sur la vitesse à sens unique de la lumière réalisées jusqu'à présent sont cohérentes avec une valeur isotrope qui est égale à la vitesse à double sens. Toutefois, aucune expérience n'est capable d'éliminer un ensemble de théories dans lesquelles la vitesse à sens unique de la lumière est anisotrope et donc différente de la vitesse à double sens. Toutes les théories issues de ce groupe possèdent la propriété que la vitesse du *voyage aller-retour* de la lumière est isotrope dans un référentiel inertiel quelconque, mais que la vitesse à *sens unique* est isotrope uniquement dans un référentiel de prédilection lié à l'« éther ». Dans toutes ces théories, dans tous les référentiels inertiels, les effets du transport d'horloge ralentie compensent exactement les effets de la vitesse à sens unique anisotrope de la lumière. Toutes ces théories sont expérimentalement indiscernables de la relativité restreinte. En pratique, cependant, la vitesse à sens unique de la lumière a été mesurée et est constante. Mais un léger soupçon plane encore.

Challenge 137, page 89: Consultez la référence citée. Le facteur 2 a été omis ici, pouvez-vous le déduire ?

Challenge 140, page 90: Bien que de nombreuses publications prétendent examiner ce problème, il y a également suffisamment de physiciens qui font remarquer cette impossibilité. La mesure d'une variation de la vitesse de la lumière n'est pas très éloignée de la mesure de la vitesse à sens unique de la lumière : celle-ci n'est pas possible. Cependant, les discussions sur ce sujet sont houleuses, ce problème prendra beaucoup de temps avant d'être enterré.

Challenge 141, page 92: La loi en l'inverse du carré de la gravitation ne se conforme pas au principe de la vitesse maximale, nous ne voyons pas très bien comment elle change lorsqu'on se place dans la situation d'un observateur mobile.

Challenge 142, page 97: Prenez une surface se déplaçant à la vitesse de la lumière, ou une surface définie avec une précision inférieure à la longueur de Planck.

Challenge 143, page 103: Les ombres non plus ne restent pas parallèles sur des surfaces courbes. Le fait d'oublier cela peut conduire à d'étranges méprises : de nombreux arguments qui ont prétendument « prouvé » que les hommes n'ont jamais été sur la Lune négligent cette réalité lorsqu'ils font allusion aux photographies prises là-bas.

Challenge 144, page 105: Si vous en découvrez une, publiez-la puis envoyez-la à l'auteur de ce livre.

Challenge 146, page 111: Si c'est le cas, publiez-la puis envoyez-la à l'auteur de ce livre.

Challenge 147, page 113: Par exemple, il est possible d'imaginer une surface qui possède une forme tellement complexe qu'elle traversera tous les atomes de l'Univers à une vitesse quasiment identique à celle de la lumière. Une telle surface n'est pas physique, car il est impossible d'imaginer des observateurs placés en tous ses points qui se déplacent de cette manière, tous en même temps.

Challenge 148, page 114: Nombreux sont ceux qui ne croient pas encore en ces limites, ainsi toute proposition de contre-exemple ou de paradoxe supplémentaire vaut le coup d'être publiée.

Challenge 150, page 119: Si c'est le cas, publiez-le puis envoyez-le à l'auteur de ce livre.

Challenge 153, page 121: Si c'est le cas, publiez-la puis envoyez-la à l'auteur de ce livre.

Challenge 155, page 124: Ils sont accélérés vers le haut.

Challenge 156, page 124: Dans la vie quotidienne, (a) la surface de la Terre peut être considérée comme plate, (b) les effets dus à la courbure verticale sont négligeables, et (c) les effets transversaux sur la longueur sont insignifiants.

Challenge 160, page 125: Pour un bus puissant, l'accélération est de $2\,\mathrm{m/s^2}$, pour une accélération sur 100 m, cela fait une variation relative de fréquence de $2,2 \cdot 10^{-15}$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 161, page 126: Oui, l'absorption et l'émission de lumière sont toujours des phénomènes qui convertissent, sans aucune perte, l'énergie en masse et vice versa.

Challenge 164, page 127: Pour un rayon lumineux, dans les deux cas la situation est décrite par un environnement dans lequel les masses « chutent » du côté opposé à la direction du mouvement. Si la Terre et les parois du train n'étaient pas visibles – par exemple si elles étaient masquées par un épais brouillard –, il n'y aurait aucune manière de déterminer par l'expérience dans quelle situation on se trouve. Ou encore, si un observateur était enfermé dans une boîte, il ne pourrait pas faire de distinction entre une accélération constante et une gravité constante. (Important : cette impossibilité s'applique uniquement si l'observateur possède une taille négligeable !)

Challenge 170, page 129: Les deux chutent vers le centre de la Terre. Des particules en orbite sont également en chute libre, leur distance relative varie de la même façon, comme expliqué dans ce texte.

Challenge 173, page 131: Un tel graphique exigerait d'avoir quatre, voire cinq dimensions.

Challenge 175, page 133: L'énergie due à la rotation peut être négligée par rapport à toutes les autres énergies présentes dans ce problème.

Challenge 185, page 138: Des nucléons différents, des noyaux distincts, des atomes différents et des molécules différentes ont des pourcentages distincts d'énergie de liaison par rapport à la masse totale.

Challenge 187, page 140: En chute libre, la bouteille et l'eau restent au repos l'une par rapport à l'autre.

Challenge 188, page 141: Laissez tomber ce dispositif. Le fil élastique est alors suffisamment fort pour tirer la balle dans la coupe. Lisez M. T. Westra, Einsteins verjaardagscadeau, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **69**, p. 109, avril 2003. Dans le dispositif original, un ressort était également attaché au fil.

Challenge 189, page 141: Mis à part les chaises et les tables déjà mentionnées, les bretelles, les ceintures et les sacs plastique sont des dispositifs antigravitants importants.

Challenge 195, page 141: Ils utilisent une balance à ressorts et mesurent le temps d'oscillation. À partir de ce dernier, ils déduisent leur masse.

Challenge 196, page 142: La pomme frappe la paroi environ une demi-heure après.

Challenge 200, page 143: Avec $\hbar$ comme moment cinétique minimum, nous obtenons environ 100 Tm.

Challenge 201, page 143: Non. La diffraction des faisceaux ne le permet pas. La théorie quantique aussi rend cela impossible : des états liés de particules sans masse, tels des photons, ne sont pas stables.

Challenge 203, page 144: Le rayon orbital est de 4,2 rayons terrestres, ce qui fait env. 38 µs chaque jour.

Challenge 204, page 145: Pour être honnête, les expériences ne sont pas cohérentes. Elles supposent qu'une certaine autre propriété de la nature est constante – comme la taille atomique – laquelle dépend en fait aussi de G. Nous en dirons plus sur ce sujet à la page 270.

Challenge 205, page 145: Bien évidemment, d'autres dimensions spatiales pourraient exister, qui peuvent être décelées uniquement à l'aide d'appareils de mesure. Par exemple, des dimensions cachées pourraient se manifester à des énergies non accessibles dans la vie courante.

Challenge 215, page 153: Puisqu'il n'y a pas de masse négative, les champs gravitoélectriques ne peuvent pas être neutralisés. À l'inverse, les champs électriques peuvent être neutralisés autour d'un conducteur métallique avec une cage de Faraday.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 228, page 162: Nous devons mesurer le temps d'arrivée des pulsations qui traversent la Terre à l'emplacement de plusieurs détecteurs d'ondes gravitationnelles sur Terre.

Challenge 247, page 170: Non, une ligne ne peut pas avoir une courbure intrinsèque. Un tore est véritablement intrinsèquement courbé, il ne peut pas être découpé puis réduit à une feuille de papier plate.

Challenge 269, page 179: La trace du tenseur d'Einstein est égale au scalaire de Ricci négatif, il est donc la négation de la trace du tenseur de Ricci.

Challenge 286, page 191: En réalité, dans la relativité générale, l'énergie gravitationnelle ne peut pas être localisée dans l'espace, contrairement à ce que nous pourrions attendre et exiger d'une interaction.

Challenge 299, page 200: Il y a une bonne chance pour qu'une certaine forme ténue d'un jet puisse exister, mais sa détection ne sera pas facile.

Challenge 303, page 205: La vitesse est mesurée avec l'effet Doppler, généralement en observant la raie Lyman-α. La distance est beaucoup plus difficile à expliquer. La mesure des distances est une science à part entière, selon qu'on mesure des distances d'étoiles dans la Galaxie, d'autres galaxies ou de quasars. N'importe quel ouvrage d'astronomie ou d'astrophysique permet d'en apprendre plus.

Challenge 306, page 214: Le lapin observe que tous les autres lapins semblent s'éloigner de lui.

Challenge 312, page 219: Tenez-vous dans une forêt en hiver, et essayez de regarder l'horizon. Si la forêt est très profonde, vous verrez des troncs d'arbre dans toutes les directions. Si la forêt est de profondeur finie, vous avez une chance d'observer l'horizon.

Challenge 328, page 235: L'Univers ne peut pas être observé depuis l'extérieur. Il ne possède donc pas de propriétés d'état.

Challenge 333, page 238: L'aplatissement dû à la rotation exige la présence d'autres masses pour fournir l'arrière-plan par rapport auquel se produit cette rotation.

Challenge 363, page 253: Cela se produit de la même manière que le champ électrique statique qui s'échappe d'une charge. Dans les deux cas, les champs transversaux ne sortent pas, mais les champs longitudinaux le font. La théorie quantique en apporte la raison profonde. Des particules réelles de rayonnement, qui sont responsables des champs transversaux libres, ne peuvent pas quitter un trou noir à cause de la vitesse de libération. Cependant des particules virtuelles le peuvent, car leur vitesse n'est pas limitée par la vitesse de la lumière. Tous les champs longitudinaux statiques sont engendrés par des particules virtuelles. En outre, il y a une deuxième raison. Le champ classique peut s'échapper d'un trou noir parce que, pour un observateur extérieur, tout ce qui constitue le trou noir est perpétuellement en train de chuter, et aucun constituant n'a véritablement traversé l'horizon. Les sources du champ ne sont donc pas encore hors d'atteinte.

Challenge 367, page 254: Cette description retrace tout cela. Une impression visuelle peut en être trouvée dans la salle consacrée aux trous noirs au « Deutsches Museum » de Munich.

Challenge 376, page 261: Tout dispositif qui utilise des miroirs exige la prise en compte de l'électrodynamique. Sans celle-ci, les miroirs sont inconcevables.

Challenge 378, page 263: La théorie de la Terre creuse est correcte si les distances usuelles sont modifiées de manière cohérente selon $r_{tc} = R^2_{Terre}/r$. Cela implique un quantum d'action qui décroît en direction du centre de la sphère creuse. Alors, il n'existe aucune manière de préférer une description plutôt que l'autre, excepté pour des raisons de simplicité.

Challenge 392, page 285: Il est probable que la quantité ayant la plus grande variation soit la masse, où un préfixe pour $1\,\mathrm{eV}/c^2$ serait utile, de même que pour la masse totale présente dans l'Univers, qui est environ 10^{90} fois plus grande.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 393, page 286: La formule avec $n - 1$ est un choix plus convenable. Pourquoi ?

Challenge 396, page 289: Non, seulement les propriétés des parties de l'Univers. L'Univers lui-même ne possède aucune propriété, comme indiqué à la page **??**.

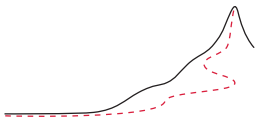
Challenge 397, page 291: Ce ralentissement progresse en *proportion quadratique* avec le temps, parce que chaque nouveau ralentissement s'ajoute au précédent !

Challenge 398, page 293: Le double de ce nombre, le nombre constitué de la suite de tous les nombres pairs, etc.

Challenge 401, page 319: Cela pourrait être résolu avec une astuce similaire à celle utilisée pour l'irrationalité de chacun des deux termes de la somme, mais personne n'en a décelée une.

Challenge 402, page 319: Il y a toujours de nombreuses découvertes qui attendent d'être révélées en mathématiques modernes, particulièrement en topologie, en théorie des nombres et en géométrie algébrique. Les mathématiques ont un avenir radieux.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



CRÉDITS

Remerciements

Nombreux sont ceux qui ont su entretenir leur don de curiosité et qui ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Saverio Pascazio a été – présent ou non – une référence constante pour ce projet. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller et, avant toutes choses, ma femme Britta ont tous apporté de précieux conseils et encouragements.

De nombreuses personnes ont aidé ce projet grâce à leurs précieuses informations. Parmi les plus pertinentes, il y a celles de Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, les innombrables améliorations apportées par Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farinati, les nombreuses améliorations d'Eric Sheldon, les avis développés d'Andrew Young, l'aide persévérante et les conseils de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide considérable, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des renseignements importants ont été fournis par Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier, Peter Brown, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Sergei Kopeikin, et de nombreuses autres personnes qui souhaitent rester dans l'anonymat.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et Achim Blumensath sur les polices et la mise en page, et avec l'assistance répétée et précieuse de Donald Arseneau. L'aide provient également de Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

Toutes les illustrations et animations dans ce texte ont été mises à disposition par leurs détenteurs des droits d'auteurs. Je les remercie tous chaleureusement. Ils sont cités dans les sections des crédits photographiques et filmographiques. Plus particulièrement, Lucas Barbosa et José Antonio Díaz Navas ont produit des animations spécialement pour ce livre, et Luca Gastaldi, Antonio Martos et Ulrich Kolberg ont composé des images spécifiquement pour celui-ci. La mise en page et le design de ce livre sont dus à la consultation professionnelle de Ulrich Dirr. Les suggestions et l'assistance de ma femme Britta comptent également pour beaucoup dans le design de l'ouvrage et de son site Web.

Depuis Mai 2007, la Klaus Tschira Foundation supporte généreusement l'édition et la publication électronique du livre *Motion Mountain*.

Crédits photographiques

La photographie du ciel nocturne de la page 14 est protégée par les droits d'auteur et est aimablement fournie par Anthony Ayiomamitis ; elle est consultable sur son magnifique site Web www.perseus.gr. La photographie de la reconstitution de l'expérience de Fizeau à la page 19 est protégée par les droits d'auteur par AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg, et est aimablement fournie par Jan Frercks, Peter von Heering et Daniel Osewold. Le cliché d'une impulsion lumineuse sur la page 19 est aimablement fourni et est protégé par les droits d'auteur par Tom Mattick. Les données et les images de l'expérience de Michelson–Morley à la page 34 sont gracieusement offertes et sont la propriété de Stephan Schiller. Les images relativistes du voyage à travers le Stonehenge simplifié de la page 48 sont la propriété de Nicolai Mokros et sont aimablement fournies par Norbert Dragon. Les scènes relativistes de la page 49 et 49 sont gracieusement offertes et sont la propriété de Daniel Weiskopf. La photographie de la stalactite de la page 93 est protégée par les droits d'auteur ; elle est aimablement fournie par Richard Cindric et est consultable sur le site Web www.kcgrotto.org. Les figures de galaxies des pages 197, 197, 198, 199, 199, 200, 204, 219, 231 et 231 sont gracieusement offertes par la NASA. Les cartes de l'Univers de la page 206 et le diagramme de Hertzsprung–Russell de la page 209 sont la propriété de Richard Powell et sont aimablement fournis par lui, ils sont tirés de son site Web www.atlasoftheuniverse.com. Les portraits historiques des physiciens reproduits dans ce livre ne sont pas protégés par des droits d'auteur, sauf lorsque cela est mentionné. Tous les schémas qui ne sont pas explicitement mentionnés sont protégés par le droit d'auteur © 1997 – 2010 de Christoph Schiller. Si vous soupçonnez qu'un droit d'auteur est attribué ou obtenu de manière incorrecte, cela n'est pas intentionnel et vous êtes aimablement invités à en faire part à l'auteur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

INDEX DES NOMS

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où la personne est présentée plus en détail.

A
Abraham Michelson, Albert 33
Abramowicz, M.A. 314
Ackermann, Peter 317
Adelberger, E. 315
Adenauer, Konrad 115
Adler, C.G. 300
Aetius 196, 309
Ahmad, Q.R. 297
Aichelburg, P.C. 313
Alanus de Insulis 241
Alcubierre, M. 305
Allen, Woody 204
Alspector, J. 295
Alväger, T. 295
Anderson 182
Anderson, I.M. 308
Anderson, J.D. 301
Anderson, J.L. 308
Antonini, P. 295, 297
Antoon Lorentz, Hendrik 33
Aristarque 294
Aristarque de Samos 18
Aristote 294
Arnowitt 190
Aronson, Jeff 329
Aronson, Jeff K. 317
Arseneau, Donald 329
Ashtekar, A. 301, 316
Ata Masafumi 329
Audoin, C. 317
Augel, Barbara et Edgar 329
Ayiomamitis, Anthony 330

B
Babinet, Jacques 275
Bachem 127
Baez, John 329
Baggett, N. 295
Bagnoli, Franco 329
Bailey, J. 297
Bailey, J.M. 295
Banday, A.J. 313
Barberi Gnecco, Bruno 329
Barbosa, Lucas 330
Barbour, Julian 312
Barrow, J.D. 313
Bartel, Elmar 329
Bartocci, Umberto 65
Basri, G. 309
Bateman, H. 297
Bautista, Ferdinand 329
Beaty, William 329
Becker, A. 310
Bedford, D. 306
Beeksma, Herman 329
Behroozi, C.H. 296
Bekenstein, J.D. 314
Bekenstein, Jacob D. 316
Bekenstein, Jakob 251
Belfort, François 329
Belic, D. 317
Bender, P.L. 308
Bennet, C.L. 312
Bergquist, J. 317
Bertotti, B. 308
Bessel, Friedrich Wilhelm 220
Besso, Michele 66
Beyer, Lothar 329
Biggar, Mark 329
Bilaniuk, O.M. 299
Bilaniuk, O.M.P. 299
Bird, D.J. 317
Birkhoff 185
Blair, D.G. 317
Blair, David 305
Blandford, R. 313
Blandford, R.D. 306
Blau, Stephen 40
Bloser, P.F. 306
Blumensath, Achim 329
Bohr, Niels 22
Bombelli, L. 315
Bombelli, Luca 329
Bondi, H. 303
Bondi, Hermann 296
Bonnor 161
Bonnor, W.B. 307, 313
Boone, Roggie 329
Boughn, S.P. 298
Boyce, K.R. 299
Bradley 18
Bradley, James 17
Braginsky, V.B. 306, 307
Brahm, D.E. 315
Brandes, John 329
Brault, J.W. 303
Braxmeier, C. 295
Bray, H.L. 309
Brebner, Douglas 329
Brecher, K. 294, 295
Brehme, R.W. 300
Briatore 127
Briatore, L. 304

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

B

BRIGGS

Briggs, F. 313
Bronstein, M. 313
Bronstein, Matvey 239
Brown, J.M. 299
Brown, Peter 121, 329
Bruce, Tom 329
Bruyn, A.G. de 313
Buchmann, Alfons 329
Budney, Ryan 329
Bunn, E.F. 313
Burbidge, G. 311
Burgay, M. 309
Bäßler, S. 315
Böhncke, Klaus 329
Börner, G. 310
Börner, H.G. 299

C

Caianiello, E.R. 302
Camilo, F. 309
Carilli, C.L. 313
Carlip, Steve 121, 302, 312, 329
Carneiro, S. 312
Carr, Jim 329
Carter 248
Castagnino, M. 315
Caves, C.M. 307
Celsius, Anders 284
Charpak, G. 317
Cheseaux, Jean Philippe Loÿs de 220
Chinnapared, R. 314
Choquet-Bruhat, Yvonne 308
Christodoulou, D. 314
Christophe Colomb 237, 238
Chudnovsky, D.V. 318
Chudnovsky, G.V. 318
Cindric, Richard 93, 330
Ciufolini, I. 306, 308
Ciufolini, Ignazio 150, 154, 306
Clancy, E.P. 304
Clausius, Rudolph 234, 235
Clerk Maxwell, James 37
Codling, K. 317
Cohen, M.H. 298
Colazingari, Elena 329
Conti, Andrea 329
Conway, J. 313
Copernicus, Nicolaus 18
Cordero, N.A. 308
Corongiu, A. 309
Corovic, Dejan 329
Costa, S.S. 299
Costella, J.P. 299
Couch, E. 314
Cox, A.N. 309
Crawford, F. 309
Crespi, Roberto 329

D

D'Amico, N. 309
Dahlman, John 329
Dalton, K. 309
Damour, T. 315
Damour, Thibault 268
Danecek, Petr 329
Darley, Vincent 330
Darre, Daniel 329
Davidson, C. 304
De Pretto, Olinto 22, 65
de Sitter, Willem 168
Deaver, B.S. 287
Deser 190
Deshpande, V.K. 299
Deslattes, R.D. 299
Desloge, E.A. 300
DeTemple, D.W. 319
Detweiler, S. 313
Dewey, M.S. 299
DeWitt-Morette, Cecile 308
Dicke, R.H. 306
Dickey, J.M. 310
Diehl, Helmut 264
Diemer, T. 316
Dietze, H. 296
Diez, Ulrich 330
DiFilippo, F. 299
DiFilippo, Frank 329
Dillard-Bleick, Margaret 308
Dirr, Ulrich 330
Dittus, H. 309, 315
Dobra, Ciprian 329
Domenico Cassini, Giovanni 16
Doppler, Christian 27
Dorfi, E.A. 310
Doroshkevich 208
Doroshkevich, A.G. 310
Dragon, Norbert 47, 48, 329, 330
Droste, J. 133, 304
Duguay 19
Duguay, M.A. 294
Dumont, Jean-Paul 294, 309, 310
Dutton, Z. 296
Dyson, F.W. 304
Dyson, Freeman 329
Díaz Navas, José Antonio 330

E

Eőtvős, Roland von *145*
Eckstein, G. 297
Eddington, A.S. 304
Ehlers, J. 312
Ehrenfest, P. 300
Einstein, A. 307, 312
Einstein, Albert 22, 23, 24, 38, 55, 61, 65, 123, 127, 130, 140, 148, 183, 185, 213, 262, 269, 272, 295, 300, 302
Einstein, Édouard 130
Ellis, G.F.R. 304, 311, 312
Els, Danie 330
Elswijk, Herman B. 329
Emelin, Sergei 329
Empédocle 16
Eőtvős, R. von 306
Eshelby, J. 296
Euler, Leonhard 171
Everitt, C.W. 287
Everitt, F. 315
Exton, A. 314

F

F. Fitzgerald, George 37
Faestermann, T. 310
Fairbanks, J.D. 287
Fairhust, S. 301
Falco, E.E. 312
Falk, G. 303
Farinati, Claudio 329
Farley, F.J.M. 295
Fasching, G. 196
Faulkner, A.J. 309
Fekete, E. 306
Fereira, P.G. 313

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

F

FERMANI

Fermani, Antonio 329
Feynman, R.P. 309
Feynman, Richard 188
Figer, D. 309
Finkenzeller, Klaus 329
Fischer, Ulrike 329
Fizeau, Hippolyte 19
Fließbach, Torsten 303
Floyd, R.M. 314
Ford, E.C. 306
Foster, James 302
Fowler, E.C. 295
Fowler, L.A. 307
Frank, F.C. 296
Frasinski, L.J. 317
Fredman, R.A. 309
French, A.P. 301
Frenkel, J. 296
Frercks, J. 294
Frercks, Jan 19, 330
Friedman, A. 310
Friedmann, A. 310
Friedmann, Aleksander Aleksandrowitsch *214*
Frisch, D.H. 298
Fukuda, Y. 297
Fulle, Marco 137
Furrie, Pat 329
Fölsing, Albrecht 295

G

Gabuzda, D.C. 299
Gaensler, B.M. 310
Galilei, Galileo 16
Gamow, G. 310
Gamow, George 208
Garwin, R.L. 317
Gastaldi, Luca 330
Gauss, Carl-Friedrich *173*
Gearhart, R. 296
Gehrels, N. 313
Georgi, Renate 329
Geroch, R. 315
Geroch, Robert 261
Gesellschaft, Fraunhofer 321
Gibbons, G.W. 301, 305
Gibbons, Gary 121, 135, 301, 329
Gibbs, J. Willard 93
Gibbs, J.W. 301
Gide, André 178
Giltner, D.M. 296
Giulini, D. 311
Glassey, Olivier 329
Goenner 160
Goenner, Hubert 303
González, Antonio 329
Good, R.H. 300
Gould, Andrew 164
Grahn, Alexander 330
Grebe 127
Green, A.J. 310
Greenstein, J.L. 304
Gregorio, Enrico 330
Greiner, J. 316
Greiner, Jochen 329
Grindlay, J.E. 306
Gruber, C. 298
Gruber, Christian 46
Gruber, R.P. 315
Guiragossian, Z.G.T. 296
Gutfreund, Hanoch 295
Guth, A. 312
Guth, Alan 233
Gácsi, Zoltán 329
Göklü, E. 295

H

Haber, John 329
Hadley, M. 316
Hafele 127
Hafele, J.C. 297, 304
Hakonen, P.J. 317
Haley, Stephen 329
Hall, D.B. 298
Hamilton, J. Dwayne 300
Hammond, R.T. 316
Hanns Ruder 47
Hardcastle, Martin 329
Harris, S.E. 296
Hartmann, D. 316
Harvey, A. 298, 311
Hasenöhrl, F. 300
Hasenöhrl, Friedrich 66
Hatfield, Brian 308
Hausherr, Tilman 329
Haverkorn, M. 310
Hawking 117
Hawking, Stephen 225, 251, 256, 261, 311
Hayes, Allan 329
Hayward, S.A. 302
Heckel, B. 315
Heering, Peter von 330
Helmond, Tom 121, 329
Henderson, Paula 329
Hentig, Hartmut von 7
Herschel, John 220
Hertz, Heinrich 94
Hertzlinger, Joseph 330
Hestenes, D. 297
Heumann, John 329
Higashi, R. 317
Hilbert, David 178, 181
Hillman, Chris 329
Hinshaw, G. 313
Hipparque 18
Hirth, J.P. 296
Hobbs, G. 309
Holstein, B.R. 308
Holzmüller, G. 306
Hong, F.-L. 317
Hoyle, C.D. 315
Hoyle, F. 311
Hoyle, Fred 223, 311
Hubble, Edwin *207*
Huber, Daniel 329
Hughes, R.J. 309
Huisken, G. 302
Hulse, Russel 307
Huygens, Christiaan 16
Héraclite d'Éphèse 210
Héraclès 198
Hésiode 205

I

Ilmanen, T. 302
Inverno, Ray d' 301, 303
Israel 248
Ivanov, Igor 329
Ives, H.E. 295

J

Jacobson, T. 302
Jalink, Kim 329
Jamil, M. 329

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

J

JANEK

Janek, Jürgen 329
Jentschel, M. 299
Jerie, M. 316
Jetzer, P. 309
Johansson, Mikael 329
Johnson, Samuel 294
Jones, Gareth 318
Jones, Quentin David 329
Jones, Tony 317
Jong, Marc de 329
Ju, L. 317
Juszkiewicz, R. 313

K

Köppe, Thomas 329
Kaaret, P. 306
Kalbfleisch, G.R. 295
Kalckar, Jørgen 155
Kanada Yasumasa 319
Kant, Emmanuel 196, 197, 207, 309
Kapuścik, E. 297
Karlhede, A. 316
Katori, H. 317
Kaufmann, W.J. 309
Kayser, R. 311
Keating 127
Keating, R.E. 297
Keesing, R.G. 318
Kelu, Jonatan 329
Kennedy, R.J. 295
Kepler, Johannes 220
Kerr, R.P. 313
Kerr, Roy 247
Kessler, E.G. 299
Kilmister, C.W. 300
Kiss, Joseph 329
Kittinger 128, 303
Kittinger, Joseph 124
Kjellman, J. 295
Klauder, John 303
Klaus Tschira Foundation 330
Kleppner, Daniel 307
Klose, S. 316
Knie, K. 310
Knop, R.A. 308
Knutsen, H. 310
Kogut, A. 313
Kolberg, Ulrich 330
Kontorowa, T. 296
Koolen, Anna 329
Kopeikin, S.M. 307
Kopeikin, Sergei 329
Korschinek, G. 310
Kramer, M. 307, 309
Kreuzer 134
Kreuzer, L.B. 305
Krijn, Marcel 329
Krisher, T.P. 301
Krishnan, B. 301
Krotkow, R. 306
Krumm, P. 306
Królikowski, Jarosław 329
Kröner 192
Kröner, Ekkehart 302, 309
Kubala, Adrian 329
Kumaradtya, K.K. 313
Kuzin, Pavel 329
Künzle, H.P. 314

L

Lachièze-Rey, M. 312
Lamb 145
Lamb, Frederick 314
Lambert, Johann 173
Landau, L. 309
Laplace, Pierre 241
Lasota, J.P. 314
Leibfried, G. 296
Leighton, R.B. 309
Lemaître, Georges A. *214*
Lense, J. 306
Lense, Josef 149
Lerner, L. 307
Leschiutta 127
Leschiutta, S. 304
Levi-Civita, Tullio 178
Lewis, G.N. 299
Liebscher, Dierck-Ekkehard 296
Lifshitz, E. 309
Lille, Alain de 241
Lilley, Sam 303
Linde, Johan 330
Lindh, A.G. 306
Linfield, R.P. 298
Lintel, H. van 298
Lintel, Harald van 329
Logan, R.T. 301
Lombardi, Luciano 329
Lombardo, F. 315
Longair, M. 310
Lorentz, H.A. 297
Lorentz, Hendrik Antoon 37
Lorimer, D.R. 307, 309
Lothe, J. 296
Low, R.J. 300
Luca Bombelli 329
Ludvigsen, Malcolm 302
Luke, Lucky 30
Luminet, J.-P. 312
Lundmark 207
Lundmark, K. 310
Lundmark, Knut 207
Lutes, G.F. 301
Lyne, A.G. 309
Lämmerzahl, C. 309, 315

M

MacCallum, M.A.H. 314
Macdonald, A. 315
Mach, Ernst 237
Macrobius 310
Maeterlinck, Maurice *236*
Maffei, Paolo 309
Mahoney, Alan 329
Mainwaring, S.R. 297
Maleki, L. 301
Manchester, R.N. 309
Mark, Martin van der 329
Marsh, N.D. 310
Martikainen, J.E. 317
Martos, Antonio 329, 330
Marzke, R.F. 315
Mashhoon, B. 306
Mason, W.P. 296
Masood-ul-Alam, A.K.M. 314
Massa, Corrado 121, 329
Matsas, G.E.A. 298, 299
Matthews, W.N. 300
Mattick 19
Mattick, A.T. 294
Mattick, Tom 19, 330
Mayné, Fernand 329
Mayr, Peter 329
Mazur 248
Mazur, P.O. 314

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

M

McClure-Griffiths

McClure-Griffiths, N.M. 310
McDonald, K.T. 307
McGowan, R.W. 296
McKellar, B.H.J. 299
McLaughlin, M.A. 309
McNamara, Geoff 305
McQuarry, George 329
Mellinger, Axel 195
Menten, K.M. 313
Merrit, John 329
Michaelson, P.F. 287
Michell, J. 313
Michell, John 241
Michelson 97
Michelson, A.A. 297
Minkowski, Hermann 37, 38
Mirabel, I.F. 299
Mishra 83
Mishra, L. 301
Misner 190
Misner, Charles 300
Mitskievic, N.V. 313
Mittelstaedt, H. 312
Mittelstaedt, M.-L. 312
Mlynek, J. 295
Mohazzabi, P. 303
Mohr, P.J. 318
Mokros, Nicolai 47, 48, 330
Moore, C.P. 313
Moore, Henry 171
Moortel, Dirk Van de 323, 329
Morley, E.W. 297
Moser, Lukas Fabian 329
Murdock, Ron 329
Murillo, Nadia 329
Murray, J.J. 296
Musil, Robert 219
Mutti, P. 299
Muynck, Wim de 329
Myers, E.G. 299
Møller, Christian 300
Müller, H. 295
Müller, J. 315

N

Nagano, M. 316
Namouni, Fathi 329
Narlikar, J.V. 311
NASA 169
Natarajan, V. 299
Nemiroff, R.J. 306
Neumaier, Heinrich 121, 329
Newman, E.T. 313
Newton 285
Nicolai, H. 308
Niepraschk, Rolf 330
Nieto, L.M. 308
Nietzsche, Friedrich 105
Nieuwpoort, Frans van 329
Nightingale, J.D. 303
Nordström, Gunnar 247
Nordtvedt, Kenneth 315
Novikov 208
Novikov, I.D. 310
Novikov, Igor 302, 313

O

Oberdiek, Heiko 330
Oberquell, Brian 329
Observatoire de la Côte d'Azur 169
Oey, M.S. 310
Offner, Carl 329
Ohanian, H.C. 301
Okhapkin, M. 295, 297
Olbers, Wilhelm 220
Olum, K.D. 305
Oostrum, Piet van 329
Oppenheimer, R. 313
Oppenheimer, Robert 243
Osewold, Daniel 330
Osserman, Bob 232
Ovidius, Publius Ovidius Naso 20

P

Page, Don 329
Pahaut, Serge 329
Panov, V.I. 306
Papapetrou, A. 299
Parker, Barry 310
Parks, David 329
Pascazio, Saverio 329
Pasi, Enrico 329
Paul, W. 299
Pauli, Wolfgang 55, 308
Pavlis, E.C. 306
Pearson, T.J. 298
Peeters, Bert 329
Pekár, V. 306
Pelt, J. 311
Pelt, Jaan 230
Penrose 117
Penrose, R. 298, 302, 314
Penrose, Roger 249, 256, 312
Penzias, Arno 208
Peres, A. 313
Perini, Romano 329
Perkins, D.H. 297
Perlman, E. 313
Perot 127
Peşić, P.D. 311
Peters, A. 295
Pfister, Herbert 312
Philpott, R.J. 300
Piper 161
Piper, M.S. 307
Piraino, S. 306
Planck, Max 55, 70, 74, 95
Platon 223
Poincaré, Henri 24, 35, 37, 123, 142
Poincaré, J.H. 299
Possenti, A. 309
Pound 127
Pound, R.V. 304
Powell, Richard 206, 209, 330
Pradl, O. 295
Prakash, A. 314
Preston, Tolver 66
Pretto, Olinto De 295
Prigogine, Ilya 312
Primas, L.E. 301
Prince, G.E. 316
Pritchard, Carol 329
Pritchard, D.E. 299
Pritchard, David 61
Proença, Nuno 329
Protagoras 285
Pryce, M.H.L. 299
Purves, William 329

R

Rahtz, Sebastian 330
Rainville, S. 299
Rankl, Wolfgang 329
Rao, S.R. Madhu 323

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

R

RASIO

Rasio, F.A. 307
Rawlinson, A.A. 299
Raymond, D.J. 300
Readhead, A.C.S. 298
Rebka 127
Rebka, G.A. 304
Recami, E. 299
Redondi, Pietro 329
Refsdal, S. 311
Reissner, Hans 247
Renselle, Doug 329
Reppisch, Michael 329
Ricci-Cubastro, Gregorio *178*
Riemann, Bernhard *193*
Rindler, W. 297, 298
Rindler, Wolfgang 296, 301, 303, 308
Ritz 295
Rivas, Martin 329
Robertson, H.P. 214
Robertson, Will 330
Robinson 248
Robinson, D.C. 314
Rodriguez, L.F. 299
Roll, P.G. 306
Rossi, B. 298
Rothbart, G.B. 296
Rothenstein, B. 297
Rothmann, T. 312
Rottmann, K. 300
Roukema, B.F. 312
Rozental, I.L. 316
Ruben, Gary 329
Ruder, H. 315
Ruffini, R. 301, 305, 313, 314
Ruffini, Remo 303
Rugel, G. 310
Ruggiero, M.L. 300, 307
Ruppel, W. 303
Rusby, R.L. 318
Rusby, Richard 318
Russel, Bertrand 74
Rybicki, G.R. 298
Rømer, Ole 16

S

S.R. Madhu Rao 329
Saint Augustin 311
Samuel, Stuart 307
Sands, M. 309
Santander, M. 308
Santangelo, A. 306
Sastry, G.P. 298
Scarcelli, G. 296
Schaefer, B.E. 295, 296
Scharmann, Arthur 315
Schiller, Britta 329, 330
Schiller, C. 301
Schiller, Christoph 301, 330
Schiller, Isabella 329
Schiller, P. 296
Schiller, Peter 329
Schiller, S. 295, 297
Schiller, Stephan 34, 329, 330
Schneider, M. 315
Schneider, P. 312
Schramm, Herbert 315
Schramm, T. 311
Schucking, E. 298, 311
Schutz, B.F. 307
Schutz, Bernard 302
Schwarzschild 127
Schwarzschild, Karl 133
Schäfer, G. 315
Sciama, D.W. 312
Sciama, Dennis 238, 312
Scott, Jonathan 329
Searle, Anthony 47
Seeger, A. 296
Seielstad, G.A. 298
Selig, Carl 295
Seneca, Lucius Annaeus 258
Sexl, R.U. 313
Sexl, Roman 263
Shapiro, I.I. 307, 308
Shapiro, Irwin I. 164
Shaw, R. 298
Shea, J.H. 303
Sheldon, E. 298
Sheldon, Eric 329
Shih, Y. 296
Short, J. 318
Siart, Uwe 330
Sierra, Bert 329
Silk, J. 313
Simon, Julia 329
Simon, R.S. 298
Singh, T.P. 314
Singleton, Douglas 329
Sitter, W. de 308
Sitter, Willem de 218
Slabber, André 329
Smale, A.P. 306
Smith, J.B. 298
Snider, J.L. 304
Snyder, H. 313
Snyder, Hartland 243
Soffel, M. 315
Soldner 162, 163
Soldner, J. 305
Soldner, Johann 139
Solomatin, Vitaliy 329
Sonoda, D.H. 313
Stachel, John 302
Stairs, I.H. 307, 309
Stark, Johannes 28
Stedman, G.E. 297, 317
Stephenson, G. 300
Stephenson, G.J. 299
Stilwell, G.R. 295
Stocke, J.T. 313
Stodolsky, Leo 297
Stoney, G.J. 314, 317
Stoney, George Johnston 279
Story, Don 330
Straumann, N. 311
Stromberg 207
Stromberg, G. 310
Stromberg, Gustaf 207
Su, Y. 306
Sudarshan, E.C. 299
Sudarshan, E.C.G. 299
Supplee, J.M. 298
Surdin, Vladimir 329
Svensmark, H. 310
Synge, J.L. 299
Szuszkiewicz, E. 314

T

Takamoto, M. 317
Tangen, K. 309
Tarko, Vlad 329
Tartaglia, A. 307
Taylor, B.N. 318
Taylor, J.H. 283, 307, 308
Taylor, Joseph 160, 307
Tegelaar, Paul 329

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

T

TEGMARK

Tegmark, M. 308
Terrell, J. 298
Thaler, Jon 329
Thies, Ingo 329
Thirring, H. 306
Thirring, Hans 149
Thomas, Llewellyn 55
Thompson, C. 310
Thompson, J.K. 299
Thompson, R.C. 299
Thorndike, E.M. 295
Thorne, K.S. 307
Thorne, Kip 300
Tisserand, F. 306
Tolman, R.C. 299
Tolman, Richard 313
Torre 182
Torre, C.G. 308
Torrence, R. 314
Townsend, Paul 329
Trevorrow, Andrew 330
Trout, Kilgore 233
Tuppen, Lawrence 329
Turner, M.S. 312

U

Uguzzoni, Arnaldo 329
Ulfbeck, Ole 155
Unruh, W.G. 303
Unruh, William 124
Unwin, S.C. 298
Upright, Craig 330

V

Valencia, A. 296
van Lintel, Harald 46
Vanier, J. 317
Vannoni, Paul 329
Vermeil 171
Vermeil, H. 308
Vermeulen, R. 313
Vessot 127
Vessot, R.F.C. 304
Virgile, Publius Vergilius Maro 146
Voigt, Woldemar 37
Volin, Leo 329
Voltaire 285
von Laue, Max 73
Voss, Herbert 330
Vuorinen, R.T. 317
Völz, Horst 317

W

Wald, R.M. 314
Walker, A.G. 214
Walker, Gabriele 310
Walker, R.C. 298
Wallin, I. 295
Wallner, A. 310
Wambsganss, J. 312
Wang, Y. 308
Warkentin, John 330
Watson, A.A. 316
Weinberg, Steven 303, 311
Weisberg, J.M. 307
Weiskopf, Daniel 47, 49, 50, 330
Weiss, Martha 329
Weitzmann, Chaim 148
Wesson, Paul 220, 311
Westra, M.T. 326
Wheeler 247
Wheeler, J.A. 305
Wheeler, John 261, 315
Wheeler, John Archibald 242
White, M. 312
Whitney, A.R. 298
Wierda, Gerben 329
Wierzbicka, Anna 329
Wijk, Mike van 329
Will, C. 295, 302, 305
Will, C.M. 301, 315
William Morley, Edward 33
Williams, R. 304
Wilson, Robert 208
Wirtz 207
Wirtz, C. 310
Wirtz, Carl 207
Wise, N.W. 287
Woods, P.M. 310
Wright, Joseph 330
Wright, Steven 273

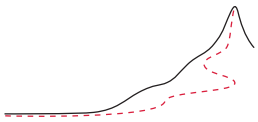
Y

Yearian, M.R. 296
Young, Andrew 329

Z

Zaccone, Rick 330
Zalm, Peer 329
Zedler, Michael 329
Zeeman, Pieter 33
Zeilinger, A. 317
Zensus, J.A. 298
Zeus 198
Zhang 145
Zhang, W. 306
Zhao, C. 317
Zwicky, F. 312
Zwicky, Fritz 230

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



INDEX DES SUJETS

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où le mot-clé est défini ou présenté en détail. L'index des sujets joue donc le rôle d'un glossaire.

Symboles
4-coordonnées 38
4-moment *70*

A
a (année) *213*
aberration *18*, 47
acausal *40*
accrétion *254*
accélération 297
accélération de la lumière 26
accélération propre *69*
accélération relativiste *69*
accélération uniforme *81*
accélération, comportement relativiste 79
accélération, théorème de composition 83
ADN 285
âge *218*
âge de l'univers 65
âge de la Terre 291
âge de la Voie lactée 292
âge du Soleil 292
agoraphobes *216*
air 226
aire de Planck, corrigée 121
Aldébaran 229
algèbre d'Einstein 261
Alluvium 212
Alnilam 229
Alnitak 229
Altaïr 229
amas globulaires 202
ampère *274*
angle de mélange électrofaible 288
annihilation 223
année tropicale 289
année-lumière 289
anomalie Pioneer *195*
antimatière *64*, *189*, 223
aphélie *292*
apogée 291
Apollo 168, 320
apprentissage, meilleure méthode 9
approche brutale de la force 106
arbre 63, 86, 126, 285
arbres, apparition 212
arc-en-ciel 324
Archaeozoicum 211
archéen *211*
argument du trou *262*
arrière-plan *38*
artéfact 275
astronautes 138
atome, formation 211
atto 276
avancée du périastre 166
avancée du périhélie 268
azoïque *211*

B
B1938+666 230
balances de torsion 305
barres, distance 80
bateau 18
becquerel 276
Bellatrix 229
Big Bang 219, 223, 224
Big Bang n'était pas une singularité 117
billard 58
BIPM 274, 275
blancs, cheveux 50
bombe 60
boîtes 88
bradyons *63*
Brans–Dicke, théorie de 187
bras, homme 237
bretelles 326
brosse à dents 22, 256
Bureau International des Poids et Mesures 274
bus 125
bus, meilleure place 50
Bételgeuse 229

C
Caenozoicum 212
calculs de perturbations 259
calorie *284*
Cambrien 212
candela *274*
Canopus 229
capture de la lumière 247
capture gravitationelle 246
Carbonifère 212
catadioptre lunaire 169
causalité et vitesse maximale 40
cause à effet 39
censure cosmique *117*, *256*, 314

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

C

CENTI

centi 276
centre de masse *64*
Čerenkov, rayonnement 24
CERN 297
chaise comme machine à voyager dans le temps 43
champ de l'inflation *234*
champ gravitomagnétique *152*
champ gravitoélectrique *152*
chandelle 281
charge du positron 287
chariot qui indique le sud 194
chevaux-vapeur, valeur maximale 96
cheveux blancs 50
choc *62*
chocolat 220
chute libre perpétuelle 243
chuter *145*
ciel 227
cinglés 31, 296
cinématique relativiste *34*
circonspection 291
ciseaux 52
CL0024+1654 231
classes stellaires 228, 229
claustrophobes *216*
clôture 36
Coccinelle 171
CODATA 318
collapsars *243*
collier de perles 50
collision *62*
commencement de l'univers 207
commencement du temps 207
Commission Internationale des Poids et Mesures 274
comprendre *259*
concept théorique 252
condition faible sur l'énergie *142*
conditions initiales 210, 225
conformes, transformations 76
Conférence Générale des Poids et Mesures 274, 285
connexion métrique *189*
constance de la vitesse de la lumière 77
constante cosmologique 179, *183*, 222, 289
constante de Boltzmann 55, 288
constante de couplage de Fermi 288
constante de couplage fort 288
constante de couplage gravit. 288
constante de Hubble *207*, 289
constante de la loi du déplacement de Wien 289
constante de Planck originale 287
constante de Planck réduite 287
constante de Rydberg 288
constante de Stefan–Boltzmann 289
constante de structure fine *277*, *288*, 288
constante gravitationnelle constante 117
constante magnétique 288
constante électrique 288
constellation colorée 228
constellations 196
conteneur *38*
contraction 194
contraction des longueurs 46, 298
contraction relativiste *36*
contraction tensorielle *179*
convention de genre espace *67*
convention de genre temps *67*
Convention du Mètre 274
conversion de bits en entropie 289
coordonnées rationnelles 293
coordonnées, quatre *66*, *68*
corps humain, émission de lumière 282
corps rigides, n'existent pas dans la nature 89
corps solide 89
corps solide, accélération et longueur limite *89*
corps, rigide 89
correction relativiste *36*
correspondance, principe 184
cosinus hyperbolique *82*
cosmique, censure 117
cosmonautes 35, 124, 141
coulomb 276
couplage minimal, principe 184
couplage spin–orbite 168
couplage spin–spin 168
couple *153*
courage 23
courbure 130, 131, 133, *171*
courbure du vide 179
courbure extrinsèque *169*
courbure gaussienne *171*, 172
courbure intrinsèque *170*
courbure moyenne *178*
courbure sectionnelle *175*
covariance générale, principe 184
création 226
Crétacé 212
Cygnus X-1 255
cénozoïque *212*
cône de lumière du futur *39*
cône de lumière du passé *39*

D

dame, vieille et circonspecte 74
dans toutes les directions 238
de cisaillement théorique, contrainte 104
de l'espace-temps, dualité 264
de vision nocturne, lunettes 282
degré Celsius 276
degré, unité d'angle *276*
demi-grand axe *167*
densité baryonique 290
densité critique *215*
densité de photons 290
densité lumineuse *282*
densité moyenne de la Terre 291
densité propre *181*
diagramme de Hertzsprung–Russell *209*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dieux 183, 235
diffraction 191
dilatations *76*
Diluvium 212
dimension, quatrième 40
dinosaures 212
dislocations *29*
dispositif d'antigravité, breveté 141
dispositif rétro-réfléchissant lunaire 169
disque vinyle 52
disques d'accrétion *200*
distance des barres *80*
distance moyenne de la Lune 291
distance propre *67*
double sens, vitesse de la lumière 88
Draconis, Gamma 18
dynamique newtonienne modifiée *316*
déca 276
décalage Doppler vers le rouge *228*
décalage temporel 268
décalage vers le bleu 28
décalage vers le rouge 28, 240
décalage vers le rouge gravitationnel *127*, *228*
décalage vers le rouge, mécanismes 240
décalage vers le rouge, tests 268
décalage vers le rouge, variable *28*
déci 276
défaut de masse chimique *60*
défaut de masse, mesure 61
défi, classement *9*
défi, niveau *9*
défis 9, 15–21, 23–26, 28–32, 34–36, 38, 40, 41, 43–47, 50–52, 54, 56–66, 68–78, 80–90, 92, 97, 103, 105, 110, 111, 113, 114, 118–121, 123–129, 131–135, 137–147, 149, 152–154, 156, 157, 159–168, 170–172, 174–177, 179–182, 184, 185, 189–195, 197, 198, 200, 205, 207, 208, 214, 215, 218–223, 226, 228, 230, 233, 235–240, 242, 243, 245–254, 256–261, 263, 267, 271, 272, 276, 277, 279–281, 284–287, 289, 291, 293, 312, 317, 319
dépendance en $1/r^2$ 268
désintégration des photons 239
détecteurs, portes 28
déviation de la lumière 268
déviation géodésique *194*
Dévonien 212

E

écart-type *286*
éclair 20, 281
éclair, couleur 321
éclairement lumineux *281*
éclairement énergétique *281*
écoulement du temps 263
effet de lentille gravitationnelle *230*
effet Doppler *27*, 47
effet Doppler gravitationnel *127*
effet géodésique *168*, 268
effet Josephson 275
effet jouvence 44
effet Mössbauer 127
effet Nordtvedt 117, 315
effet projecteur *47*
effet Thirring *149*
effet Thirring–Lense *149*, 168, 246
effets de marée 246
effets en champs forts *267*
effondrement *255*
élasticité *134*
électricité, début 213
électron *15*
électron, taille 89
électronvolt *279*
ellipse 166, 245
Ellis 261
émission décalée d'ondes gravitationnelles 268
en bref, relativité générale 266
énergie *59*
énergie au repos *61*
énergie cinétique relativiste 60
énergie de l'Univers 234
énergie gratuite 60
énergie gravitationnelle *181*, 191
énergie limitée 70
énergie potentielle 71
énergie potentielle en relativité *71*
énergie sombre *60*, 203
énergie, cinétique relativiste 70
énergie, non découverte 60
énergie, potentielle relativiste 71
entraînement de référentiel *149*, *153*, 164
entropie 234
entropie du trou noir 250
Éocène 212
époque GUT *210*
équilibre thermodynamique 243
équivalence masse–énergie 60
équivalence, principe 184
ergosphère *248*, 249
erreurs aléatoires *286*
erreurs systématiques *286*
espace de la vie 258
espace vide *77*
espace, absolu 34, 35
espace-temps *38*, *139*
espace-temps de Minkowski 38
étalon, pomme 285
état de l'univers 235
éther et relativité générale 104, 132
éther, également appelé éther luminifère 297
étoiles 211
événements 38
évolution, limite *215*
exa 276
exactitude *286*
excentricité *166*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

E

EXCENTRIQUES

excentriques 263
excès de rayon *172*
explosion 224
expérience de pensée *106*

F
facteur d'échelle *76*, 220
facteur de dilatation *36*
facteur de dilatation du temps *25*
farad 276
faux *23*
femmes 30, 247, 248
femto 276
fenêtre 52
fluctuations de densité 211
flux d'énergie 281
fond diffus de rayonnement cosmologique 312
force *94*, 190
force centrifuge 253
force de l'horizon *99*
force de Planck 95
force limite 94
force minimale dans la nature *121*
force parfaite 266
force, maximum, hypothèses 105
forces de marée 129, 175, *193*
forme 46
formule de la composition des vitesses *32*
Friedmann–Lemaître, solutions 214
fusée 249

G
galaxie *197*, 238
galaxies, formation *211*
gazon 36
Gedanken experiment 106
genre espace 67
genre temps 67
giga 276
Gondwana 212
GPS, global positioning system 144
gravitation *115*
gravitation comme mécanisme de freinage 96
gravitation universelle comme conséquence de la force maximale 187
gravitation universelle, écart à la 222
gravitodynamique *156*
gravitomagnétisme 268
Gravity Probe B 150
gravité *124*
gravité de surface d'un trou noir *242*
gray 276, *280*
groupe conforme 76, *77*
génie *22*, *136*
géocaching *144*
géodésique, de genre lumière *136*
géodésique, de genre temps *136*
géodésiques de genre lumière *189*
géodésiques nulles *189*

H
hadrons 210
haut-parleur 22
hecto 276
henry 276
hertz 276
heure *276*
Hollywood, films 75
Holocène 212, 213
Homo 213
Homo sapiens 213
Homo sapiens sapiens 213
Horace, en latin Quintus Horatius Flaccus 123
horizon *208*, 242, *243*, 324
horizon des événements *85*
horizon et accélération 106
horizon, s'éloignant plus vite que la lumière 52
horizons *92*
horizons en tant que systèmes limites 266
horloge géométrodynamique *261*
horloge, synchronisation 24, *29*
horloges 259
hydrogène 224
hydrogène atomique *283*
hydrogène, fusion 211
hyperbole 166, 245
hypernovae 201
hypersurfaces *78*
hypothèse de la Terre creuse *263*
hélium 15, 211, 224

I
Icare 167, 268
id. *145*, *173*
imaginaire, masse 63
impulsions lumineuses, tournant l'une autour de l'autre 143
impédance caractéristique du vide 288
incandescence *227*
incertitude totale *286*
indépendance temporelle de *G* 268
inertiel *35*
inertielle, masse 132
inflation *210*, *233*, 233, *269*
intensité lumineuse *281*
interaction, la gravité est-elle une *190*
interféromètre *33*
interféromètres 284
interféromètres en anneau 284
intervalle *67*
intervalle d'espace-temps *38*
intrinsèque *170*
intrinsèque, courbure 172
invariance conforme *76*, *77*
invariance par difféomorphisme *182*, 262
invariants du tenseur de courbure 194
inversion *76*
inégalité de Penrose 117
Io 16
isotrope *172*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

J
JERK

J
jerk relativiste *69*
jets *200*
joule 276
jour sidéral 289
jour, unité de temps *276*
journée ensoleillée 281
Jurassique 212

K
k-calculus *25*
kaléidoscope 232
katal 276
kelvin *274*
kilo 276
kilogramme *274*
kilogramme, prototype 268
Klitzing, von – constante 289

L
l'air ne peut pas remplir l'univers 223
l'eau ne peut pas remplir l'univers 223
la lumière ne se déplace plus *192*
LAGEOS 306
lagrangien 139
lait 20, 198
Large Electron Positron 30
largeur totale de la courbe à la moitié du maximum 286
Laurasie 212
lentille gravitationnelle 255
LEP 30
ligne d'univers *40*
limite statique *248*
Linux 19
liquide 180
litre *276*
loi de la paresse universelle *74*
loi de Laplace–Gauss *286*
longueur d'onde de Compton 289
longueur d'onde de de Broglie 275
longueur de Planck *260*
longueur gravitationnelle de la Terre 291
longueur propre 44
lumen 276
luminosité 281
luminosité du Soleil 291
lumière 26
lumière massive 26
lumière, mouvement qu'on ne peut pas arrêter 26
lumière, pesée *61*
lumière, plus rapide que la 142
lumière, polarisation longitudinale 26
lumière, vitesse finie 220
Lune 268
Lune, formation 211
Lune, mesure de sa distance par faisceau laser 294
lunettes de vision nocturne 282
Lunokhod 168, 320
lux 276, 281
Lyman-α 321

M
M31 197
M51 199
Mach, principe 184
machine à voyager dans le temps 43
magnétar 203
magnéton nucléaire 289
main 63
main dans le vide 303
mammifères 212
mammifères, apparition 212
manuel, bijou 300
marche à pied, olympique 51
Mars 167, 280
marées 304
maser 127
masse *57*
masse ADM *190*
masse de Jupiter 292
masse de la Lune 291
masse de la Voie lactée 292
masse du Soleil 291
masse gravitationnelle et inertielle, égalité *184*
masse imaginaire 63
masse inertielle *71*
masse irréductible *250*
masse relativiste *71*
masse totale, en relativité générale *190*
masse, centre de *64*
masse, gravitationnelle 132
masse, égalité entre inertielle et gravitationnelle 145
matelas 131, 154, 155, 158, 159
matière noire *60*, 203, 271
matière, domination *211*
matière, métastable 243
maximale, force 92
maximale, puissance 92
Megrez 229
Messier, catalogue des objets célestes 197
mesure de la distance de la Lune par faisceau laser 294
mesure de la vitesse des astres 28
mesures de vitesse 77
micro 276
mile 277
milli 276
minimum, force dans la nature *121*
Mintaka 229
minute *276*, *292*
Miocène 212
mole *274*
molécule 143
moment cinétique comme tenseur 73
MOND *316*
montagne 63
mort 18
moteur 22
moteurs de la puissance maximale 96
moteurs de recherche 294
moto 89
mouvement *124*
mouvement et unités de mesure 275
mouvement hyperbolique *82*
mouvement lent 65
mouvement microscopique

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

M

MOUVEMENT

269
mouvement non perturbé *15*
mouvement qu'on ne peut pas arrêter, lumière 26
mouvement supraluminique 52
mouvement, n'existe pas 39
muons *297*, 298
mètre *274*
mètres étalons 259
méga 276
mégaparsec *207*
mémoire 40
mésozoïque *212*
métrique *67*, *75*
métrique de Schwarzschild *132*, *244*

N

naines blanches 202, 229
naines brunes 202, *229*, 229
nano 276
NASA 280
naviguer 18
navire 18
neutrino 31, 210, 297, 321
neutrinos 75
New General Catalogue 198
newton 276
NGC 205 198
Nit 282
noir, peinture 220
noir, tourbillon 249
nombre d'Avogadro 288
nombre imaginaire *63*
nombre infini de préfixes du SI 285
normale, loi 286
normalité *318*
normalité de π 293
nova *208*
novae 201
noyaux 210
nuage 246
Nuage de Magellan 197
nuages *199*
nucléosynthèse *210*
nues, singularités 256
nul *170*
nébuleuse d'Andromède 197, 207
nébuleuse de la Tarentule 197
négatif *171*
Néogène 212

O

objet réel *63*
objet virtuel *63*
obscurité 52
obscurité, vitesse 51
observateur comobile *79*
odomètre 68
ohm 276
oiseaux, apparition 212
Olbers 220
Oligocène 212
ombre *15*
ombres 52
ombres et rayonnement 15
ombres non parallèles 325
ombres, vitesse 21, 30, 51
onde de gravité plane 158
ondes de gravité *154*
ondes en relativité 73
ondes gravitationnelles 154
ondes gravitationnelles, spin 156
ondes gravitationnelles, vitesse 157, 161
ondes sonores 28
orbites 188
Ordovicien 212
ordre, partiel *40*
Orion 62, 228
Oxford 266
oxygène, apparition dans l'atmosphère 310

P

π 72
π, normalité de *292*
Paléocène 212
Paléogène 212
paléozoïque *212*
Pangée 212
parabole 166, 245
paradoxe d'Ehrenfest *72*
paradoxe d'Olbers *220*
paradoxe de la puissance *113*
paradoxe des horloges *42*
paradoxe des jumeaux *42*
paradoxe du collier de perles 50
paradoxe du trou *262*
paramètre d'impact *163*
paramètre de décélération *216*
paramètres d'impacts 246
parapluies 18
parfaite, force 266
parfaite, vitesse 266
parsec 207, 289
particule ultra-relativiste *70*
particules massives *26*
particules ponctuelles, taille 252
particules virtuelles 327
particules élémentaires, taille 89
pascal 276
peinture noire 220
pendule de Foucault 149
Permien 212
permittivité diélectrique du vide 287
perméabilité magnétique du vide 287
perpétuelle, chute libre 243
pesée de la lumière 61
phot 282
photons, désintégration 239
physique, début 213
pico 276
pierres 63, 136, 137, 243
pièges de Penning *61*
planche de surf 45
Planck, unités corrigées 279
plantes, apparition 212
planètes extrasolaires 229
planètes, formation 211
planéité asymptotique 190
plasma *200*
plastique, sacs 326
Pliocène 212
plus rapide que le mouvement de la lumière, collisions 63
plus rapide que le mouvement lumineux observé dans un

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

P

PLUS

référentiel accéléré 87
plus vite que la lumière 142
Pléiades, amas d'étoiles 212
Pléistocène 212
PNP, formalisme post-newtonien paramétrisé *143*
poids *145*
pomme étalon 285
pommes 146
pommiers 285
positif *170*
post-newtonien, formalisme 143
potentiel vecteur gravitomagnétique *152*
poussière *181*
poussières d'étoiles *213*
poussée *37*
poussée de Lorentz *98*, 98
poussées de Lorentz 76
Príncipe, île de 304
première loi de la mécanique de l'horizon *100*
première loi de la mécanique du trou noir *100*
pressé 75
primates, apparition 212
principe cosmologique *207*
principe d'équivalence *124*, *184*, 268
principe d'équivalence faible 305
principe de correspondance *184*
principe de couplage minimal *184*
principe de covariance générale *184*
principe de Mach *184*, *237*
principe de relativité *35*
principe de relativité générale *184*
problème de la matière noire *222*
processus chimiques 61
Procyon 229
promenade de Planck 283
propre, accélération 79
propre, vitesse *41*
protonvolt 280
prototype du kilogramme 268
protérozoïque *211*
précession 168
précession de Thomas *55*, 168
précision 31, *286*, *287*
préfixes *276*, 317
préfixes du SI 285
préfixes, SI 276
présent *40*
PSR 1913+16 160
PSR B1913+16 154
PSR J0737-3039 154
puissance *71*, 281
puissance maximale dans la nature 254
puissance, maximum, hypothèses 105
pulsar 198
pulsars 160, 268
pulsars binaires 144, 167
périastre *166*
périgée 291
périhélie *166*, *292*
période glaciaire 213
période rayonnante 15
péta 276
pôle Nord 129, 225

Q

Q0957+561 230
quadri-accélération *69*
quadri-impulsion *69*
quadri-jerk *69*
quadrivecteur *68*
quadrivecteur impulsion–énergie *70*
quadrivitesse *68*
quadrupôle *159*
quantité de mouvement 69
quantité de mouvement relativiste *58*, *69*
quantum d'action 74
quantum de conductance 289
quantum du flux magnétique 289
quarks 210
quasar *53*
quasars 255
Quaternaire 212
quatrième dimension *38*, 40

R

radar 28
radian *275*
radioactivité 280
radioactivité alpha 208
raies d'absorption solaire 127
raies de Fraunhofer 127, 321
rajeunissement 138
rapidité *32*
rapport de fréquence de Josephson 289
rapport de masse proton–électron 289
rapport gyromagnétique *254*
rayon classique de l'électron 289
rayon de Bohr 289
rayon de la Lune 291
rayon de la Terre 291
rayon de Schwarzschild *133*, *242*
rayon de Schwarzschild comme unité de longueur *279*
rayon irréductible *250*
rayonnement 90
rayonnement Cerenkov 24
rayonnement de corps noir *227*, 312
rayonnement de fond cosmologique *219*, 224
rayonnement de fond diffus 213
rayonnement de fond diffus cosmologique *208*
rayonnement gravitationnel 303
rayonnement quadrupolaire 159
rayonnements *15*
rayons *15*
rayons α *15*
rayons β *15*
rayons γ *15*
rayons cathodiques *15*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

R

RAYONS

rayons cosmiques 43, 65
rayons infrarouges *15*
rayons ionisants *15*
rayons ultraviolets *15*
rayons X *15*
recombinaison *211*
recouvrement des impôts 274
rectiligne *81*
rectitude 15
relation d'incertitude, relativiste 89
relation de cause à effet 40
relation de dispersion 158
relation de Kepler 159
relativité générale *24*, *123*
relativité générale en dix points 266
relativité générale en un seul paragraphe 175
relativité générale, formules 135
relativité générale, première moitié 134
relativité générale, précision 267
relativité générale, seconde moitié 139
relativité restreinte 15, *24*
repos *123*, *124*
restreinte, relativité 15
Rigel 229
rigidité 46
Robertson–Walker, solutions 214
rosace 245
rosace, trajectoire 247
rotation de la Terre 283
réflexion 191
réfraction 191
réfraction, (indice) du vide 163
référentiel *80*
référentiel d'inertie *35*
référentiel inertiel *80*
référentiels accélérés *80*
Régulus 229
réversible *250*

S

Saiph 229
sans dimension 288
satellites galiléens 16
satellites LAGEOS 150
Saturne 93
scalaire de Ricci 176, *178*, 179
science-fiction 60
seau, Newton, expérience 237
seconde *274*, *276*, *292*
sections coniques *166*
sens unique, vitesse de la lumière 88
Service international de la rotation terrestre *283*
SI, unités *274*
SI, unités supplémentaires *275*
siemens 276
sievert 276, *280*
Silurien 212
singularités 117, 186, 311
singularités habillées 256
singularités nues *256*
sinus hyperbolique *82*
Sirius 229, 304
Sloan Digital Sky Survey 309
snooker 58
Sobral, île de 304
Soleil 211, 229
Soleil, mouvement dans la galaxie 198
solide, corps 89
sondes Voyager 18
sous-marin, relativiste 47
sphère des photons *247*
spin d'une onde *156*
spin des ondes gravitationnelles 156
spin et propriétés ondulatoires classiques 158
squark 329
stalactite 93
stalagmites 18
stellaire, trou noir 255
Stoney, unités 279
stéradian *275*
supernovae 201, *208*
supraluminique, mouvement 52
supérieur *59*
surface, physique *113*
surfeur des neiges, relativiste 45
sursauts de rayons gamma 21, 294
sursauts gamma 201, 232, 316
symboles de Christoffel de seconde espèce *189*
symétrie d'échelle *182*
symétrie par renversement 77
synchronisation des horloges 24, 29
système d'unités de Heaviside–Lorentz 279
système d'unités gaussiennes 279
système d'unités électromagnétiques 279
système d'unités électrostatiques 279
système de coordonnées rigide *80*
Système géodésique mondial 292
Système International d'Unités (SI) *274*
systèmes matériels 90
sécante hyperbolique *84*

T

tachyon *53*, 53, *63*
tachyon, masse 63
tachyons 63, 90
taille de l'électron 89
taille de la Voie lactée 292
taille des chaussures 285
taille limite 116
taille limite du système physique 116
Tamise 18
tangente hyperbolique *84*
TDB 143
TDT 143
temps *40*
temps coordonnée barycentrique 305
temps d'arrêt, minimum 107
temps de l'horloge 132

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

T

TEMPS

temps de la montre-bracelet 38
temps dynamique barycentrique *143*
temps dynamique terrestre *143*
temps propre *38*, *68*
temps universel coordonné *143*, *283*
temps, absolu 34, 35
température du fond diffus micro-onde 290
température, relativiste 56
tenseur d'Einstein *179*
tenseur de courbure 172
tenseur de courbure de Riemann 192
tenseur de courbure de Riemann–Christoffel *192*
tenseur de Ricci 102, *178*
tenseur de Riemann *193*
tenseur énergie–impulsion 102, *180*
tenseurs 178
tension 133
tentative par la corde 106
Terre creuse 263
Terre, anneau avoisinant 199
Terre, contraction des longueurs 45
Terre, formation 211
Terre, rotation 283
Tertiaire 212
tesla 276
textes écrits 213
thermodynamique, deuxième principe de la 40
théorie d'Einstein–Cartan 271
théorie de la relativité *24*
théorème de la composition des accélérations 83
théorèmes de l'existence de singularités de Penrose–Hawking 256
théorèmes de singularité de Penrose–Hawking 314
Time, revue 130
tire-bouchon 158
TNT, contenu énergétique 289
tonne *276*
torsion 271
tour en brique infiniment haute 108
tourbillon noir 249
trace du tenseur 175
trains 125
trajectoires du mouvement *266*
transformation, conforme *50*
transformations conformes spéciales *76*
transformations de Lorentz de l'espace et du temps *37*
translation *76*
translations, enchaînement 55
Trias 212
trou noir 103, 161, 227, *243*, *304*
trou noir de Kerr *247*
trou noir de Reissner–Nordström *247*
trou noir de Schwarzschild *247*
trou noir en rotation 248
trou noir extrémal *248*
trou noir intermédiaire *255*
trou noir stellaire *255*
trou noir supermassif *254*
trou noir, auréole 254
trou noir, collisions 255
trou noir, entropie 250
trous noirs 93, *133*, 303
trous noirs de Schwarzschild *245*
trous noirs primordiaux *254*
trous noirs, n'existent pas 252
TUC 143
tunnel 53
téléportation 56
télévision 31
téra 276

U

udeko 276
udekta 276
UICPA 318
UIPPA 318
ultra-relativiste, particule 70
Union Géodésique et Géophysique Internationale 292
unité *274*
unité astronomique 289
unité de longueur naturelle de Planck *260*
unités de base *274*
unités de Planck corrigées *279*
unités de Stoney 279
unités naturelles de Planck *277*
unités SI 286
unités, non SI 277
unités, véritables naturelles *279*
Univers 238
univers *238*
univers complet *205*
univers présumé *205*
univers visible *204*
univers, rempli d'eau ou d'air 223
univers, âge 65
univers, énergie 234
univers, état 235
UNIX 19

V

variables d'Ashtekar 270
variance *286*
variation de masse, maximum 96
variété 38
variété riemannienne *193*
vecteur de Poynting 159
vecteur, de genre espace *40*
vecteur, de genre lumière *40*
vecteur, de genre temps *40*
vecteur, nul *40*
vecteurs nuls 67, *68*
vendeko 276
vendekta 276
vent 18
vide *261*
vide, main dans 303
vie, apparition 211
vieille dame circonspecte 74
vieillissement maximum *75*
vitesse de l'obscurité 51, *52*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

V

VITESSE

vitesse de la lumière à double sens *88*
vitesse de la lumière à sens unique *88*
vitesse de la lumière, finie 220
vitesse de la lumière, théories avec variable 90
vitesse de libération 241
vitesse des ombres *52*
vitesse des ondes gravitationnelles 157, 161
vitesse du son, valeurs 88
vitesse parfaite *16*, 266
vitesse propre *41*, 323
vitesse relativiste *68*
vitesse supraluminique 233
vitesse, plus rapide que la lumière 71
vitesse, relative 72
vitesse, relative – non définie 176
Voie lactée 196
Volkswagen 171
volt 276
voyage dans le passé 40
voyage temporel dans le futur 42
Vénus 167

W
watt 276
weber 276
weko 276
wekta 276
WMAP 119

X
xenno 276
xenta 276

Y
yocto 276
yotta 276
Yucatán, impact 212

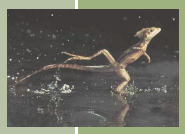
Z
zepto 276
zetta 276

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'Aventure de la Physique – Vol. II

La Relativité



Pourquoi le changement et le mouvement existent-ils ?
Comment l'arc-en-ciel se forme-t-il ?
De tous les voyages possibles, lequel est le plus fantastique ?
L'« espace vide » est-il réellement vide ?
Comment pouvons-nous faire léviter des objets ?
À partir de quelle distance entre deux points
devient-il impossible d'en intercaler un troisième ?
Que signifie « quantique » ?
Quels problèmes demeurent sans réponse en physique ?

En répondant à ces questions ainsi qu'à d'autres sur le mouvement, cette collection constitue une introduction à la physique moderne qui se veut divertissante tout en mettant l'esprit à l'épreuve, chaque page proposant une surprise ou un défi à l'imagination.

En partant de la vie quotidienne, cette aventure donne un aperçu des derniers résultats en mécanique, thermodynamique, électrodynamique, relativité, mécanique quantique, gravité quantique et leur unification. Ce texte s'adresse aux étudiants du premier cycle universitaire et à tous ceux qui s'intéressent à la physique.

Christoph Schiller, titulaire d'un doctorat de l'Université Libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique.

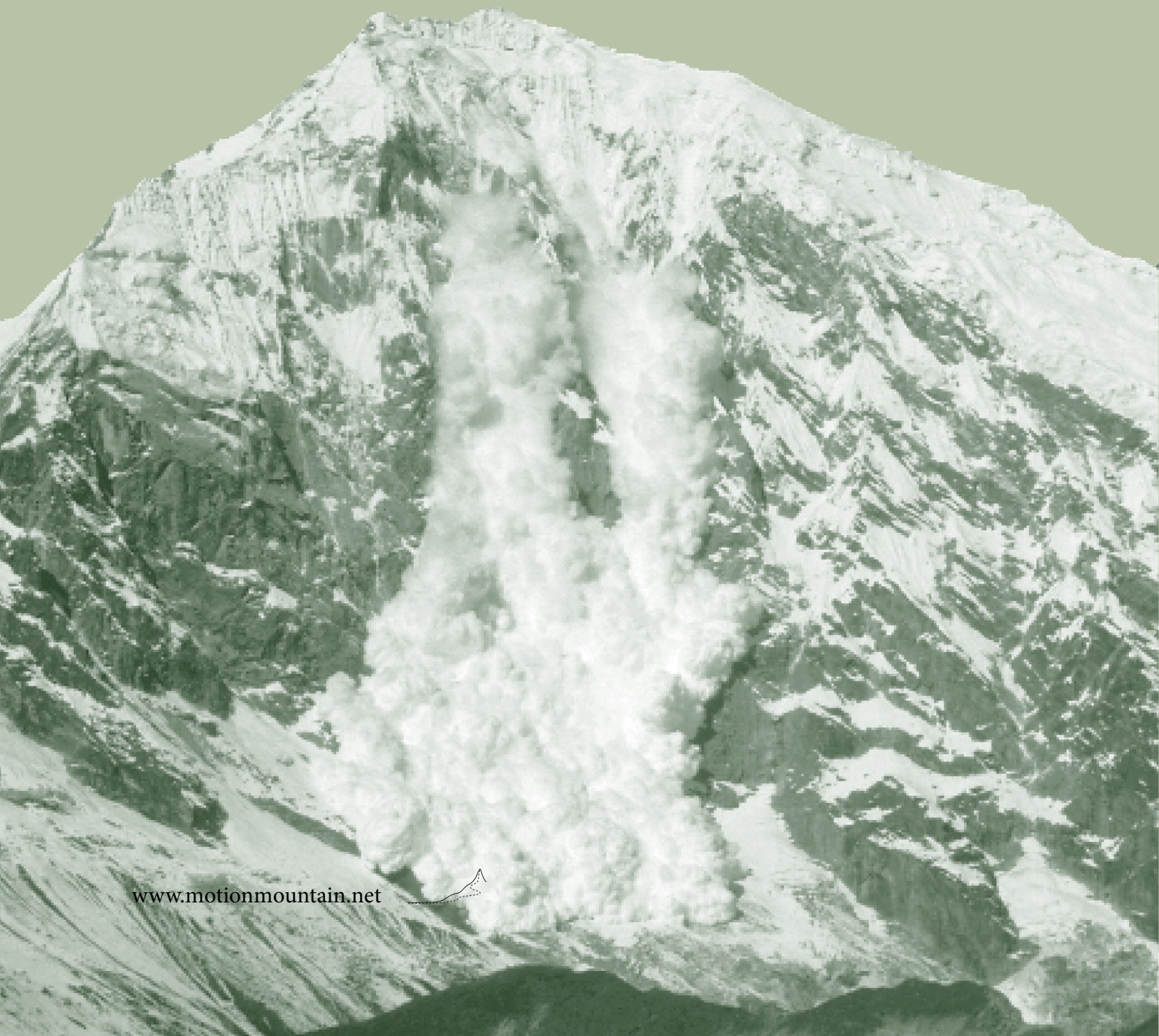
disponible gratuitement sur www.motionmountain.net

Christoph Schiller

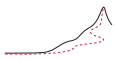
LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL. III

LUMIÈRE, CHARGES ET CERVEAU

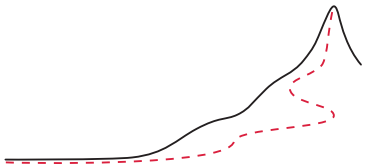


www.motionmountain.net



Christoph Schiller

La Montagne Mouvement



L'Aventure de la Physique
Volume III

Lumière, Charges et Cerveau

Traduit de l'anglais par Benoît CLENET

23e édition, disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net

Editio vicesima tertia.

Proprietas scriptoris © Christophori Schiller
secundo anno Olympiadis vicesimae nonae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliquo, quod
partem horum verborum continet ; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Vingt-troisième édition.

Copyright © 2009 Christoph Schiller,
deuxième année de la 29e Olympiade.

Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne
dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/deed.fr,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction,
distribution et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel*
produit ou service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée
sans le consentement écrit du détenteur du droit d'auteur.
Toute personne est libre de consulter, enregistrer et imprimer
ce fichier pdf pour son usage personnel, et de le diffuser par
des moyens électroniques, mais uniquement sous sa forme originale
et de manière entièrement gratuite.

À Britta, Esther et Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.

PRÉFACE

« Primum movere, deinde docere*. »

Antiquité

Ce livre s'adresse à toute personne curieuse de la nature et du mouvement. La curiosité portant sur la manière dont se meuvent les gens, les animaux, les choses, les images et l'espace nous entraîne dans de multiples aventures. Ce volume présente celles que nous rencontrons lors de l'exploration de tout phénomène électrique. Cette histoire recouvre un vaste domaine qui va de la pesée du courant électrique, de l'utilisation des champs magnétiques, de la cicatrisation d'une fracture jusqu'à la compréhension du cerveau humain.

Dans le panorama de la physique, indiqué sur la Figure 1, le mouvement engendré par l'électricité représente l'aspect le plus récent et le plus fascinant de notre point de départ. En vérité, presque tout, autour de nous, est dû à des processus électriques. Le présent volume – le troisième d'une collection qui en compte six – propose un tour d'horizon de la physique ; il résulte d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990 : présenter le mouvement d'une manière simple, moderne et vivante.

Afin d'être *simple*, le texte se focalise sur les concepts, tout en donnant aux mathématiques le niveau minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules dans les calculs. Tout ce texte est à la portée d'un étudiant qui accède au premier niveau universitaire.

Afin d'être *moderne*, ce texte est enrichi par les nombreux joyaux – aussi bien théoriques qu'empiriques – qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *vivant*, ce texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale, ce devrait être comme assister à un spectacle de magie. Nous observons, nous nous étonnons, nous n'en croyons pas nos yeux, nous réfléchissons, et finalement nous comprenons le truc. Lorsque nous observons la nature, nous faisons souvent cette même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui mettra la sagacité du lecteur à l'épreuve. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise de ce texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre sur la pédagogie due à Hartmut von Hentig, se traduit ainsi : « Fortifier les hommes, clarifier les choses ». Clarifier les choses nécessite du courage, puisque changer les habitudes de pensée engendre la peur, souvent masquée par la colère. Mais en surpassant nos peurs

* « D'abord émouvoir, ensuite enseigner ». Dans les langues modernes, ce type mentionné de *mouvement* (celui du cœur) est souvent appelé *motivation* : ces deux termes sont issus de la même racine latine.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

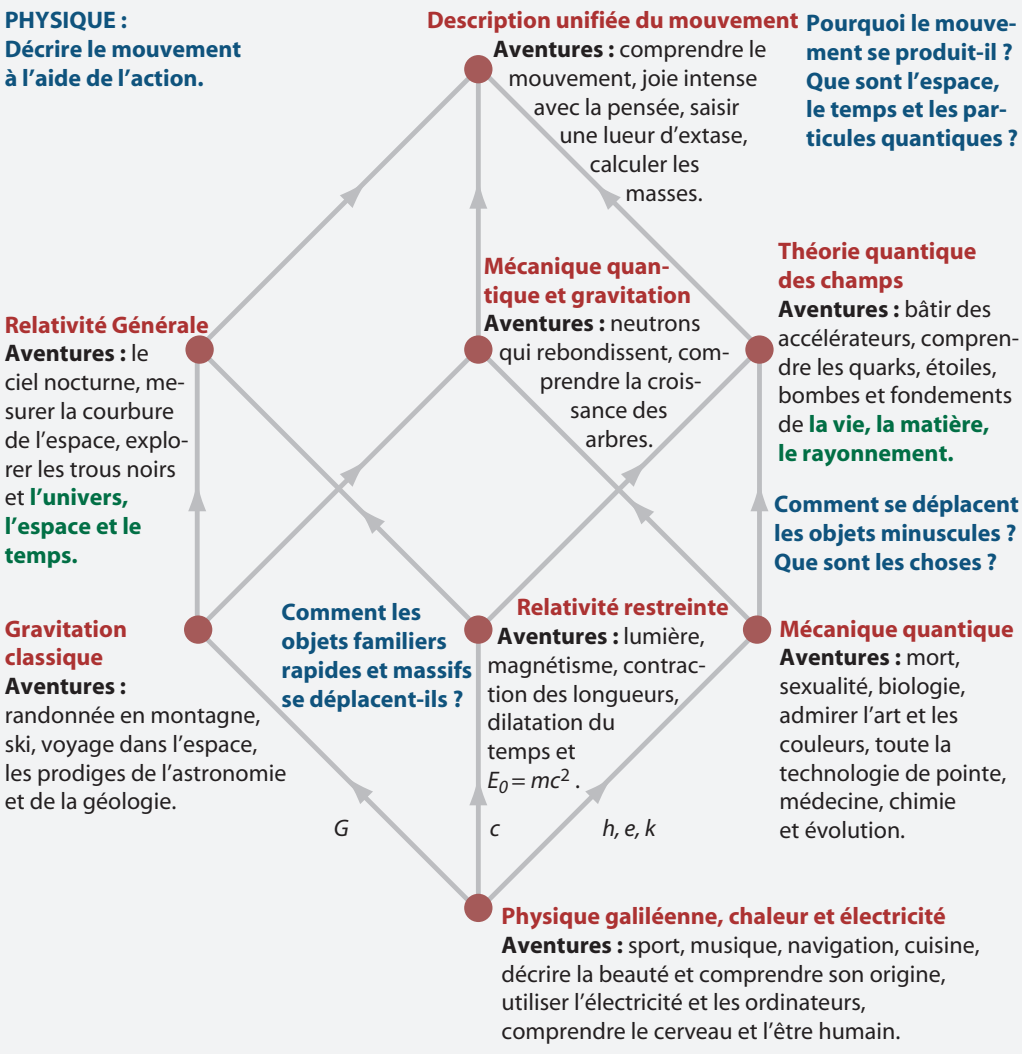


FIGURE 1 Une carte complète de la physique : les connexions sont définies par la vitesse de la lumière c, la constante de la gravitation G, la constante de Planck h, la constante de Boltzmann k et la charge élémentaire e.

nous gagnons en force. Nous ressentons alors des émotions intenses et enivrantes. Toutes les grandes aventures de la vie – et explorer le mouvement en est une – mènent à cela.

Munich, 10 Janvier 2009.

Remerciement

Je remercie Benoît Clénet pour sa traduction de ce volume. Sa patience, son énergie et son professionnalisme sont exemplaires.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Conseil au lecteur

D'après mon expérience d'enseignant, je connais une méthode d'apprentissage qui est toujours parvenue à transformer des élèves en échec en élèves gagnants : si vous lisez un livre pour l'étudier, résumez chaque section que vous lisez, *dans vos propres termes, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, lisez la section une nouvelle fois. Recommencez jusqu'à ce que vous puissiez résumer clairement ce que vous avez lu avec vos propres mots, à voix haute. Vous pouvez le faire tout seul dans votre chambre, ou avec des amis, ou tout en marchant. Si vous faites cela avec tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'apprentissage et de lecture de manière significative. De surcroît, vous prendrez beaucoup plus de plaisir à apprendre avec des bons ouvrages et détesterez nettement moins les mauvais manuels. Les prodiges de cette méthode peuvent même l'utiliser tout en écoutant un cours, à voix basse, évitant ainsi de prendre constamment des notes.

Comment utiliser ce livre ?

Le texte en vert, que l'on trouve dans un grand nombre de notes en marge, signale un lien sur lequel on peut cliquer dans un lecteur pdf. Ces liens en vert sont soit des références bibliographiques, des notes de bas de page, des références croisées vers d'autres pages, des solutions aux défis ou des pointeurs vers des sites Web.

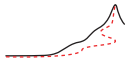
Les indices et solutions des *défis* sont donnés dans l'annexe. Les défis sont classés ainsi : niveau recherche (r), difficile (d), niveau étudiant standard (s) et facile (e). Les défis des types r, d ou s pour lesquels aucune solution n'a encore été incorporée dans le livre sont marqués (pe).

Appel à contribution

Ce texte est et demeurera librement téléchargeable depuis Internet. En échange, envoyez-moi s'il vous plaît un bref courriel à fb@motionmountain.net, à propos des questions suivantes :

— Qu'est-ce qui n'était pas clair ?
— Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris ?
Défi 1 s — Qu'est-ce qui devrait être amélioré ou corrigé ?

Vous pouvez également ajouter votre retour directement sur www.motionmountain.net/wiki. Au nom de tous les lecteurs, merci par avance pour votre collaboration. Si votre contribution est particulièrement pertinente, et si vous le souhaitez, votre nom sera mentionné dans les remerciements, ou bien vous recevrez une récompense, ou les deux. Mais par-dessus tout, très bonne lecture !



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

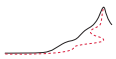


Table des Matières

14 1 Électricité liquide, champs invisibles et vitesse maximale

L'ambre, la pierre magnétique et les téléphones portables 15 • Comment peut-on reproduire l'éclair ? 18 • Charge électrique et champs électriques 21 • Pouvons-nous déceler l'inertie de l'électricité ? 26 • Subir les effets des champs électriques 29 • Aimants 30 • Les hommes peuvent-ils ressentir les champs magnétiques ? 31 • Comment pouvons-nous concevoir un générateur ? 32 • Champs magnétiques 34 • Champs électromagnétiques et Lagrangiens 38 • Comment les générateurs démontrent que la relativité est juste 39 • Trois réalités fondamentales concernant l'électricité 41 • Curiosités et défis amusants sur les objets électriques et magnétiques 42

53 2 Description de la dynamique du champ électromagnétique

Collisions de particules chargées 56 • Le champ de jauge – potentiel vecteur du champ électromagnétique 57 • Énergie, quantité de mouvement et moment cinétique du champ électromagnétique 61 • Le lagrangien de l'électromagnétisme 62 • Symétries – le tenseur énergie–impulsion 63 • Qu'est-ce qu'un miroir ? 64 • Quelle différence y a-t-il entre les champs électrique et magnétique ? 66 • L'électrodynamique aurait-elle pu être différente ? 67 • Le défi le plus tenace de l'électrodynamique 68 • Curiosités et défis amusants sur l'électrodynamique 68

70 3 Qu'est-ce que la lumière ?

Polarisation et électromagnétisme 75 • La lenteur des progrès en physique 84 • Un autre regard sur le rayonnement électromagnétique 84 • À quoi ressemble le monde lorsque nous chevauchons un faisceau lumineux ? 86 • La lumière voyage-t-elle toujours en ligne droite ? 86 • La focalisation de la lumière 92 • Pouvons-nous palper la lumière ? 93 • Guerre, lumière et mensonges 97 • Qu'est-ce que la couleur ? 97 • Jouons avec les arcs-en-ciel 100 • Quelle est la vitesse de la lumière ? – Rétrospective 102 • 200 ans trop tard – indices de réfraction négatifs 105 • Métamatériaux 106 • Signaux et prédictions 107 • L'éther existe-t-il ? 108 • Curiosités et défis amusants concernant la lumière 109

110 4 Les images et l'œil – l'optique

Comment démontrer que vous êtes sacré 110 • Voyons-nous ce qui existe ? 110 • Comment produisons-nous des images de l'intérieur de l'œil ? 114 • Comment réalisons-nous des hologrammes et autres images tridimensionnelles ? 115 • Imagerie optique 116 • Pourquoi pouvons-nous nous voir ? 118 • La lumière comme arme ? 120 • Curiosités et défis amusants sur l'œil et les images 121 • Les charges sont discrètes – Les limites de l'électrodynamique classique 123 • À quelle vitesse les charges se déplacent-elles ? 124 • Curiosités et défis amusants sur les charges discrètes 125

127 5 Effets électromagnétiques

L'éclair est-il une décharge électrique ? – L'électricité dans l'atmosphère 127 • Les boules de feu existent-elles ? 130 • La gravité fait-elle rayonner les charges ? 131 • Questions de recherche 132 • Lévitation 134 • Matière, lévitation et effets électromagnétiques 137 • Curiosités et défis amusants sur les effets électromagnétiques 146

150 6 Tour d'horizon sur l'électrodynamique classique et ses limites

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

152 7 La physique classique dans une coquille de noix
L'avenir de la planète Terre 154 • L'essence de la physique classique – l'infiniment petit et l'absence de surprises 156 • Pourquoi n'avons-nous pas encore atteint le sommet de la montagne ? 157

159 8 L'histoire du cerveau
L'évolution et le cerveau 160 • Les enfants, les lois et la physique 161 • Électronique des polymères 164 • Pourquoi un cerveau ? 165 • Qu'est-ce que l'information ? 167 • Qu'est-ce que la mémoire ? 168 • La puissance du cerveau 170

174 9 La pensée et le langage
Qu'est-ce que le langage ? 174 • Qu'est-ce qu'un concept ? 178 • Que sont les ensembles ? Que sont les relations ? 180 • Infini 183 • Fonctions et structures 185 • Les nombres 186 • Pourquoi faire des mathématiques ? 191 • Les mathématiques sont-elles un langage ? 192 • Curiosités et défis amusants sur les mathématiques 193

196 10 Concepts, mensonges et modèles de la nature
Les concepts physiques sont-ils découverts ou inventés ? 197 • Comment découvrons-nous les règles et les modèles de la physique ? 199 • Qu'est-ce qu'un mensonge ? 201 • Cette phrase est-elle vraie ? 206 • Curiosités et défis amusants sur les mensonges 208

210 **Observations**
Une quantité d'observations suffisante a-t-elle été relevée ? 211 • Toutes les observables physiques sont-elles connues ? 212 • Les observations prennent-elles du temps ? 214 • L'induction est-elle un problème en physique ? 215

217 **La quête de précision et ses conséquences**
Que sont les interactions ? – Aucune émergence 218 • Qu'est-ce que l'existence ? 219 • Les choses existent-elles ? 220 • Le néant existe-t-il ? 221 • La nature est-elle infinie ? 223 • L'Univers est-il un ensemble ? 224 • L'Univers existe-t-il ? 226 • Qu'est-ce que la création ? 226 • La nature est-elle inventée ? 228 • Qu'est-ce qu'une description ? 230 • Motif, objectif et interprétation 231 • Unification et démarcation 232 • Les cochons, les singes et le principe anthropique 233 • Avons-nous besoin de causes et d'effets dans les explications ? 235 • La conscience est-elle nécessaire ? 236 • Curiosité 236 • Courage 239

241 A Unités, Mesures et Constantes
Unités naturelles de Planck 244 • Autres systèmes d'unités 246 • Curiosités et défis amusants sur les unités 247 • Précision et exactitude des mesures 253 • Constantes physiques fondamentales 254 • Nombres utiles 259

261 Bibliographie

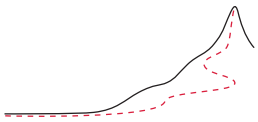
283 Indices et solutions des défis

300 Crédits
Remerciements 300 • Crédits filmographiques 301 • Crédits photographiques 301

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Lumière, Charges et Cerveau

Dans notre apprentissage du mouvement des objets,
l'aventure de la randonnée et d'autres expériences
nous conduisent à découvrir que des charges créent les images,
qu'elles se déplacent, s'accumulent et interagissent,
et qu'il existe une charge minimale dans la nature.
Nous comprenons ce qui unit l'amour aux aimants et à l'ambre,
pourquoi le cerveau est un instrument si intéressant,
et ce qui distingue un bon mensonge d'un mauvais.



Chapitre 1

ÉLECTRICITÉ LIQUIDE, CHAMPS INVISIBLES ET VITESSE MAXIMALE

Qu'est-ce que la lumière ? La relativité nous a vraiment laissés sur notre faim, bien que nous ayons plongé dans celle-ci précisément pour découvrir une réponse à cette question. C'est vrai, nous avons appris comment le mouvement de la lumière se compare à celui des objets. Nous avons également compris que la lumière est une entité en mouvement qui ne peut pas être arrêtée, que celle-ci représente la vitesse limite pour tous les types d'énergie et qu'elle constitue notre étalon de mesure pour la vitesse. Cependant, nous n'avons rien appris concernant la nature de la lumière elle-même.

Une seconde question demeure ouverte : qu'est-ce que le *contact* ? Nous ne savons toujours pas. L'unique chose que nous avons apprise est que les interactions mécaniques n'existent pas. La réponse à ces anciennes interrogations n'émerge qu'avec l'étude des types de mouvement qui *ne* sont *pas* associés à la gravitation. Il apparaît que la compréhension des expédients dont usent les magiciens pour faire léviter des objets constitue la clé de ces réponses.

Vol. II, page ??

En revisitant la liste de toutes les forces motrices que nous rencontrons dans ce monde qui est le nôtre, nous remarquons que la gravitation a beaucoup de mal à décrire n'importe laquelle d'entre elles. Ni le mouvement des vagues océaniques, ni celui du feu et des séismes, ni celui d'une petite brise ne sont engendrés par la gravité. La même chose peut être affirmée concernant le mouvement des muscles. Avez-vous déjà écouté le battement de votre cœur avec un stéthoscope ? Si vous ne l'avez pas fait, vous ne pouvez prétendre avoir une intuition du mystère du mouvement. Votre cœur effectue environ 3 000 millions de battements au cours de votre vie. Et ensuite, il s'arrête.

Page 159

Défi 2 e

Une des découvertes les plus bouleversantes de la science fut celle que les battements du cœur, les vagues océaniques et la majorité des autres cas de mouvements de la vie courante, de même que la nature de la lumière elle-même, ont un point commun avec les observations réalisées des milliers d'années auparavant concernant deux cailloux bizarres. Ces pierres montrent que tous les exemples de mouvement, qui sont qualifiés de *mécaniques* dans la vie quotidienne, sont, sans exception, d'origine *électrique*.

En particulier, la solidité, la malléabilité et l'impénétrabilité de la matière sont dues à l'électricité interne ; l'émission de la lumière est également un processus électrique. Puisque ces aspects représentent un pan entier de la vie quotidienne, nous laisserons de côté toutes les complications dues à la gravité et à l'espace-temps courbe. La manière la plus efficace d'étudier le mouvement électrique consiste à commencer, comme dans le cas de la gravité, avec les types de mouvement qui sont engendrés sans qu'il y ait le moindre contact entre les corps concernés.

Réf. 1

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 2 Objets entourés par des champs : l'ambre (env. 1 cm), la pierre magnétique (env. 1 cm) et le téléphone portable (env. 10 cm). (© Philips)

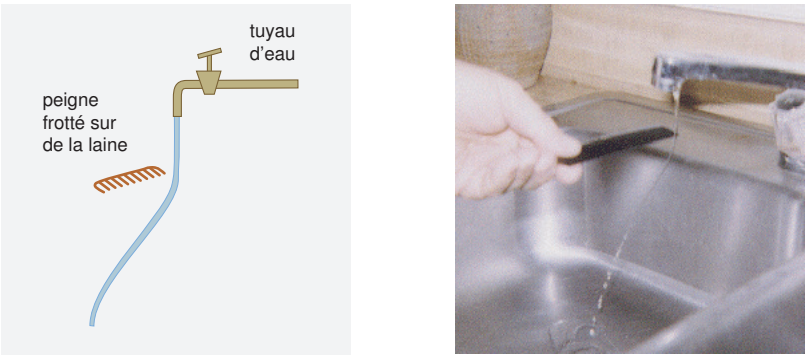


FIGURE 3 Comment épater les enfants, particulièrement par temps sec. (photo © Robert Fritzius)

L'AMBRE, LA PIERRE MAGNÉTIQUE ET LES TÉLÉPHONES PORTABLES

L'histoire de l'électricité débute avec les arbres. Ceux-ci entretiennent une relation particulière avec l'électricité. Lorsque certains arbres sont coupés, une résine visqueuse apparaît. Avec le temps, elle se solidifie et, après des millions d'années, forme l'*ambre*. Lorsque l'ambre est frotté avec une fourrure de chat, il acquiert la capacité d'attirer des petits objets, tels que de la sciure de bois ou des bouts de papier. Thalès de Milet, l'un des sept sages originaux de la Grèce, le savait déjà au sixième siècle AV. J.-C. La même observation peut être réalisée avec de nombreuses autres combinaisons de polymères, par exemple avec des peignes et des cheveux, avec des semelles de chaussures sur de la moquette, ou avec un écran de télé et de la poussière. Les enfants sont toujours ébahis par l'influence, indiquée sur la Figure 3, qu'un peigne frotté sur de la laine exerce sur un filet d'eau qui coule d'un robinet ouvert. Un autre effet captivant peut être observé lorsqu'un peigne frotté est placé près d'une bougie allumée. (Pouvez-vous imaginer ce qui se passe ?)

Défi 3 pe

Un autre chapitre de l'histoire de l'électricité concerne un minerai de fer déniché dans certaines cavernes dans le monde, plus précisément dans une région (toujours) appelée Magnésie et située dans la province grecque de Thessalie, et dans certaines régions d'Asie centrale. Lorsque deux pierres de ce minerai sont placées l'une à proximité de l'autre, elles s'attirent ou se repoussent, en fonction de leur orientation relative. De surcroît, ces

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 1 Recherches de monopôles magnétiques, c'est-à-dire de charges magnétiques.

Recherche	Charge magnétique
Charge magnétique minimale prévue par la théorie quantique	$g = \frac{h}{e} = \frac{eZ_0}{2\alpha} = 4{,}1\,\mathrm{pWb}$
Recherche dans les minerais	aucune, dipôles seuls Réf. 2
Recherche dans les météorites	aucune, dipôles seuls Réf. 2
Recherche dans les rayons cosmiques	aucune, dipôles seuls Réf. 2
Recherche à l'aide d'accélérateurs de particules	aucune, dipôles seuls Réf. 2

pierres attirent des objets constitués de cobalt, de nickel ou de fer.

Aujourd'hui nous côtoyons également divers petits objets dans la nature qui possèdent des propriétés plus sophistiquées, comme l'indique la Figure 2. Certains objets vous permettent d'allumer la télévision, d'autres de déverrouiller les portières d'une voiture, d'autres encore vous permettent de discuter avec des amis éloignés.

Toutes ces observations montrent qu'il existe dans la nature des situations où des corps exercent une influence sur d'autres situés *à une certaine distance*. L'espace qui environne un corps exerçant une telle influence est dit contenir un champ. Un *champ (physique)* est donc une entité qui se dévoile elle-même en accélérant d'autres corps situés dans sa région de l'espace. Un champ est une certaine « étoffe » qui emplit l'espace. Des expériences démontrent que les champs n'ont pas de masse. Le champ entourant le minerai découvert en Magnésie est appelé un *champ magnétique*, et les pierres sont appelées des *aimants**. Le champ situé autour de l'ambre – appelé ἤλεκτρον en grec, d'après une racine signifiant « éclatant, brillant » – est appelé un *champ électrique*. Cette dénomination est due à une suggestion du célèbre Anglais partiellement physicien William Gilbert (1544–1603), qui était médecin de la reine Élisabeth Ire. Des objets entourés par un champ électrique permanent sont appelés des *électrets*. Ils sont beaucoup moins courants que les aimants ; ils sont utilisés, entre autres, dans certains systèmes de haut-parleurs**.

Le champ environnant un téléphone portable est appelé un champ *radio* ou, comme nous le verrons plus tard, un champ *électromagnétique*. Contrairement aux champs précédents, il oscille au cours du temps. Nous nous apercevrons plus tard que de nombreux autres objets sont entourés de tels champs, quoique ceux-ci soient souvent très faibles. Des objets qui émettent des champs oscillants, comme les téléphones portables, sont baptisés transmetteurs radio ou émetteurs radio.

Les champs influencent les corps à distance, sans aucun support matériel. Pendant longtemps, il a été difficile d'en trouver dans la vie courante, puisque la majorité des pays ont des lois qui restreignent les machines qui utilisent et produisent de tels champs. La législation exige que pour tous les appareils qui se déplacent, produisent du son ou créent des films, les champs restent confinés à l'intérieur de ceux-ci. C'est pour cette raison qu'un prestidigitateur qui fait bouger un objet sur une table au moyen d'un aimant dissimulé amuse et impressionne toujours son public. Pour ressentir plus fortement cette

* Le livre de James D. Livingston, *Driving Force – the Natural Magic of Magnets*, Harvard University Press, 1996, est un merveilleux livre consacré à l'histoire du magnétisme et aux exaltations qu'il a suscitées.
** L'effet Kirlian, qui nous permet de réaliser de façon intrigante des photographies magnifiques, est causé par un champ électrique variable dans le temps.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 2 Quelques champs magnétiques observés.

OBSERVATION	CHAMP MAGNÉTIQUE
Champ magnétique mesuré le plus faible (ex. les champs des résonances de Schumann)	1 fT
Champ magnétique produit par les courants dans le cerveau	0,1 pT à 3 pT
Champs magnétiques intergalactiques	1 pT à 10 pT
Champ magnétique dans la cage thoracique humaine, dû aux courants cardiaques	100 pT
Champ magnétique produit par les muscles	...
Champ magnétique de notre galaxie	0,5 nT
Champ magnétique dû au vent solaire	0,2 à 80 nT
Champ magnétique situé directement sous une ligne électrique à haute tension	0,1 à 1 µT
Champ magnétique terrestre	20 à 70 µT
Champ magnétique dans un domicile ayant l'électricité	0,1 à 100 µT
Champ magnétique près d'un téléphone portable	100 µT
Champ magnétique qui détermine la qualité des images visuelles dans l'obscurité	100 µT
Champ magnétique près d'un aimant en fer	100 mT
Taches solaires	1 T
Champs magnétiques près d'un aimant permanent de haute technologie	max. 1,3 T
Champs magnétiques qui produisent la sensation du froid chez les êtres humains	5 T ou plus
Champs magnétiques engendrés dans un accélérateur de particules	10 T
Champ magnétique statique maximal produit avec des solénoïdes supraconducteurs	22 T
Champs magnétiques statiques les plus puissants produits en laboratoire, à l'aide d'aimants hybrides	45 T
Champs magnétiques *pulsés* les plus puissants produits sans destruction de la bobine	76 T
Champs magnétiques pulsés engendrés, pendant environ 1 µs, en utilisant des bobines qui implosent	1 000 T
Champ d'une naine blanche	10^4 T
Champs produits dans les pulsations laser pétawatt	30 kT
Champ d'une étoile à neutrons	de 10^6 T à 10^{11} T
Champ magnétique critique quantique	4,4 GT
Champ le plus puissant jamais mesuré, sur le magnétar et sursauteur gamma mou SGR-1806-20	0,8 à $1 \cdot 10^{11}$ T
Champ près du noyau d'un atome	1 TT
Champ magnétique (de Planck) maximal	$2{,}2 \cdot 10^{53}$ T

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 4 L'éclair : une photographie prise avec un appareil photo en mouvement, exhibant ses multiples flashs. (© Steven Horsburgh)

fascination pour les champs, il est préférable d'examiner plus profondément quelques résultats expérimentaux.

Comment peut-on reproduire l'éclair ?

Chacun a déjà aperçu le flash d'un éclair ou a pu observer l'effet saisissant qu'il peut avoir sur un arbre. Manifestement, l'éclair est un phénomène qui se déplace. Des photographies telles que celle de la Figure 4 montrent que la pointe du flash d'un éclair avance à une vitesse moyenne d'environ 600 km/s. Mais *qu'est-ce qui* se déplace ? Pour le découvrir, nous devons trouver une manière de reproduire l'éclair par nous-mêmes.

En 1995, la compagnie automobile General Motors redécouvrit accidentellement une méthode ancienne et simple permettant de faire cela. Ses ingénieurs avaient par inadvertance construit un mécanisme de création d'étincelles dans leurs véhicules : lors du remplissage du réservoir à essence, des étincelles étaient produites, lesquelles provoquaient parfois l'explosion du carburant. Ils durent rappeler 2 millions de véhicules de la marque Opel.

Réf. 3

Quelle erreur les ingénieurs avaient-ils commise ? Ils avaient dupliqué inconsciemment les conditions requises pour mettre en œuvre un dispositif électrique que chacun peut construire chez soi et qui fut inventé à l'origine par William Thomson* : le *générateur de Kelvin*. Pour renouveler son expérience aujourd'hui, il nous suffit de prendre

* William Thomson (1824–1907) fut un éminent physicien, fervent défenseur du parti unioniste irlandais et professeur à l'université de Glasgow. Il travailla sur la détermination de l'âge de la Terre, démontrant qu'elle avait beaucoup plus de 6 000 ans, contrairement à ce que pensaient plusieurs sectes. Il influença fortement le développement de la théorie du magnétisme et de l'électricité, la description de l'éther et de la thermodynamique. Il contribua à généraliser l'emploi du mot « énergie » au sens où il est utilisé de nos jours, à la place de termes confus plus anciens. Il fut un des derniers scientifiques à diffuser les analogies mécaniques pour l'explication des phénomènes, s'opposant ainsi vigoureusement à la description de Maxwell de l'électromagnétisme. Ce fut principalement pour cette raison qu'il ne reçut jamais le prix Nobel. Il fut également l'un des concepteurs de la pose du premier câble télégraphique transatlantique. Victorien dans ses tripes,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

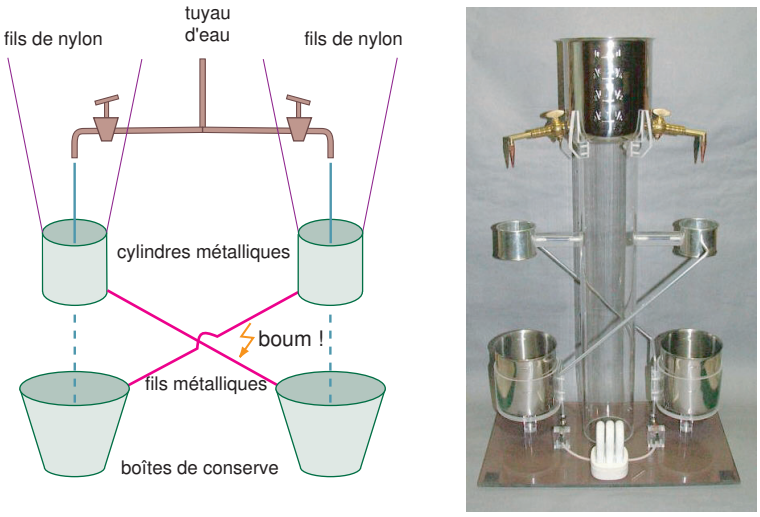


FIGURE 5 Un générateur de Kelvin élémentaire. (photographie © Harald Chmela)

deux robinets d'eau, quatre boîtes de conserve vides, que l'on doit ouvrir des deux côtés,
Réf. 4 un peu de fil de nylon et un morceau de fil métallique.

En disposant tout cela comme indiqué sur la Figure 5 et en laissant couler l'eau, nous constatons un effet stupéfiant : de grandes étincelles se produisent de temps en temps entre les deux fils de cuivre à l'emplacement où ils sont le plus près l'un de l'autre, en émettant des bruits distincts. Pouvez-vous deviner quelle condition l'écoulement doit satisfaire pour que cela puisse marcher ? Et que fit Opel pour réparer les véhicules rapa-
Défi 4 s triés ?

Si nous coupons les robinets juste avant que la prochaine étincelle se produise, nous remarquons que les deux récipients peuvent attirer de la sciure et des bouts de papier. Ce générateur agit donc de la même manière que l'ambre frotté, mais bien plus efficacement. Les deux récipients sont entourés de champs électriques. Le champ augmente avec le temps, jusqu'à ce que l'étincelle tressaille. Juste après celle-ci, les récipients sont (pratiquement) dépourvus de champ électrique. Évidemment, l'écoulement de l'eau fait que, d'une certaine manière, une entité s'accumule dans chaque récipient ; aujourd'hui nous appelons celle-ci la *charge électrique*. La charge peut s'écouler dans les métaux et, lorsque les champs sont suffisamment puissants, traverser l'air. Nous découvrons également que les deux récipients sont enveloppés par deux types distincts de champs électriques : les corps qui sont attirés par l'un des récipients sont repoussés par l'autre.

Toutes les autres expériences confirment qu'il existe *deux* types de charges. Benjamin Franklin (1706–1790), qui était un homme politique américain et également physicien, qualifiait l'électricité générée sur une baguette en verre frottée avec un linge sec de *positive*, et celle produite sur un morceau d'ambre de *négative*. (Auparavant, ces deux types de charges étaient qualifiés de « vitreux » et de « résineux ».) Des corps ayant des charges

il choisit, lorsqu'il fut anobli et fait chevalier, le nom d'un petit ruisseau qui coulait près de sa demeure comme nouveau nom, et devint baron Kelvin de Largs. C'est ainsi que l'unité de la température a tiré son nom d'une petite rivière écossaise.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

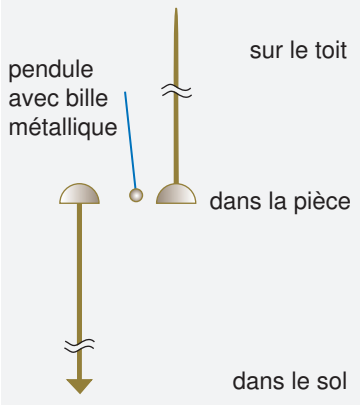


FIGURE 6 Le paratonnerre personnel de Benjamin Franklin.

de même signe se repoussent, des corps de charges opposées s'attirent, des charges de signe opposé s'écoulant ensemble s'annulent*.

En résumé, les champs électriques naissent des corps, pourvu qu'ils soient chargés. L'accumulation de charges peut être accomplie par le frottement et des processus similaires. La charge peut s'écouler : elle est alors appelée *courant* électrique. Les plus mauvais conducteurs du courant sont les polymères, ils sont qualifiés de matériaux *isolants* ou *diélectriques*. Une charge placée sur un isolant reste à l'endroit où elle a été positionnée. Au contraire, les métaux sont de bons conducteurs : une charge placée sur un conducteur se propage sur toute sa surface. Les meilleurs conducteurs sont l'argent et le cuivre. C'est la raison pour laquelle, en ce moment, après deux cents ans d'usage de la fée électricité, la plus forte concentration en cuivre du monde se trouve en dessous de la surface de Manhattan.

Bien entendu, nous devons vérifier si l'éclair naturel est véritablement d'origine électrique. En 1752, des expériences menées en France, d'après une recommandation de Benjamin Franklin publiée à Londres en 1751, ont montré que nous pouvons en réalité extraire de l'électricité d'un déluge d'éclairs, un jour d'orage, via une longue tige**. Ces expériences françaises rendirent Franklin mondialement célèbre ; elles constituèrent également le point de départ de l'utilisation des paratonnerres dans le monde entier. Plus
Réf. 5 tard, Franklin installa un paratonnerre dans sa propre propriété, mais d'un type quelque peu inhabituel, comme indiqué sur la Figure 6. Pouvez-vous deviner ce qu'il faisait dans
Défi 5 s sa pièce pendant l'orage, toutes les parties étant constituées de métaux ? (Ne reproduisez pas cette expérience : ce dispositif peut tuer.)

* En réalité, il existe de nombreuses autres manières de produire des étincelles ou même des *arcs électriques*, c'est-à-dire des étincelles prolongées. Il existe même une frange entière de la population qui exerce chez soi ce passe-temps favori. Ceux qui possèdent un budget plus important le font de façon professionnelle, dans des accélérateurs de particules. Consultez le site Web www.kronjaeger.com/hv.

** Les particularités de la manière dont l'éclair est généré et de la manière dont il se propage constituent encore un domaine de recherches. Une introduction en est donnée à la page 127.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Charge électrique et champs électriques

Si toutes les expériences avec la charge peuvent être expliquées en qualifiant les deux charges de positive et négative, cela suggère que certains corps possèdent plus de charges et d'autres corps moins de charges qu'un corps *neutre*, non chargé. L'électricité ne s'écoule donc que lorsque deux corps différemment chargés sont mis en contact. Maintenant, si la charge peut s'écouler et s'accumuler, nous devons être capables d'une manière ou d'une autre de mesurer sa quantité. Indubitablement, la *quantité* de charge qu'un corps possède, généralement notée q, est définie par l'intermédiaire de l'influence que ce corps, disons une particule de sciure de bois, ressent lorsqu'il est soumis à un champ. La charge est donc définie en la comparant à une charge standard de référence. Pour un corps chargé de masse m accéléré dans un champ, sa charge q est déterminée par la relation

$$\frac{q}{q_{\text{réf}}} = \frac{ma}{m_{\text{réf}}\, a_{\text{réf}}} \,, \tag{1}$$

c'est-à-dire en comparant ce corps avec l'accélération et la masse de la charge de référence. Cette définition reflète l'observation que la masse seule n'est pas suffisante pour caractériser complètement un corps. Pour une description complète du mouvement, nous avons besoin de connaître sa charge électrique : la charge est par conséquent la deuxième propriété intrinsèque des corps que nous découvrons dans notre promenade.

Actuellement, l'unité de la charge électrique, le *coulomb*, est définie par le truchement d'un écoulement standard à travers des fils métalliques, comme expliqué dans l'Annexe B. C'est possible parce que toutes les expériences montrent que la charge est conservée, qu'elle s'écoule, qu'elle le fait de manière continue et qu'elle peut s'accumuler. La charge se comporte donc comme une substance fluide. Ainsi, nous sommes obligés d'employer une quantité scalaire q pour sa description, qui peut prendre une valeur positive, nulle ou négative.

En pratique, la charge électrique est mesurée par le biais d'*électromètres*. Quelques-uns de ces dispositifs sont présentés sur la Figure 7. Des expériences menées à l'aide de ces appareils confirment avant tout que les charges s'écoulent et s'accumulent. Plus précisément, toutes les expériences indiquent que les charges sont conservées. Autrement dit, si la charge électrique d'un système physique change, la raison est toujours que de la charge s'écoule vers ou en dehors de ce système. Cela peut être facilement vérifié avec
Réf. 6 deux pots métalliques reliés à deux électromètres, comme indiqué sur la Figure 8.

Les principales propriétés expérimentales de la charge électrique qui ont été découvertes lors des expérimentations avec les électromètres sont listées dans le Tableau 3. Ces propriétés décrivent le comportement des valeurs de la charge électrique. Cependant, comme dans le cas de tous les concepts classiques précédemment rencontrés, la majorité de ces résultats expérimentaux concernant la charge électrique se révéleront n'être qu'approximatifs. Des expérimentations plus précises nécessiteront une révision de plusieurs propriétés. Néanmoins, on remarque qu'aucun contre-exemple à la conservation de la charge n'a été observé jusqu'à maintenant.

Un objet chargé placé près d'un autre, neutre, le polarise. La *polarisation électrique* est la séparation entre les charges positives et négatives dans un corps. Pour cette raison, même les objets neutres, comme les cheveux, peuvent être attirés vers un corps chargé, comme un peigne. Généralement, les isolants et les conducteurs peuvent tous les deux

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 7 Divers électromètres : un électromètre artisanal basé sur un pot de confiture, un ancien électromètre Dolezalek (ouvert) de haute précision, les *ampoules de Lorenzini* d'un requin, et un électromètre numérique moderne. (© Harald Chmela, Klaus Jost - www.jostimages.com, Advantest)

FIGURE 8 Un dispositif simple pour confirmer la conservation de la charge électrique : si un chiffon frotté est déplacé du premier pot vers le second, la charge prélevée à partir du premier pot est transférée au second, comme l'indiquent les deux électromètres. (© Wolfgang Rueckner)

être polarisés ; cela se produit depuis les étoiles tout entières jusqu'aux simples molé-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 3 Propriétés de la charge électrique *classique* : une densité scalaire.

Charges électriques	Propriété physique	Désignation mathématique	Définition
Peuvent être distinguées	discernement	élément d'un ensemble	Page 180
Peuvent être ordonnées	succession	ordre	Page ??
Peuvent être comparées	mesurabilité	métricité	Page ??
Peuvent varier graduellement	continuité	complétude	Page ??
Peuvent être ajoutées	accumulabilité	additivité	Page 64
Peuvent être séparées	séparabilité	positive ou négative	
Ne changent pas	conservation	invariance	q = const

TABLEAU 4 Valeurs de charge électrique observées dans la nature.

Observation	Charge
Plus petite charge mesurée non nulle	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
Charge par bit dans une mémoire d'ordinateur	10^{-13} C
Charge dans un petit condensateur	10^{-7} C
Flux de charge dans un flash d'éclair moyen	1 C à 100 C
Charge stockée dans une batterie de voiture entièrement chargée	0,2 MC
Charge de la planète Terre	1 MC
Charge séparée par une usine électrique moderne en un an	$3 \cdot 10^{11}$ C
Charge totale de signe positif (ou négatif) observée dans l'Univers	$10^{62\pm2}$ C
Charge totale observée dans l'Univers	0 C

cules.

L'attraction est une forme d'accélération. Des expériences montrent que l'entité qui accélère des corps chargés, le *champ électrique*, se comporte comme une petite flèche fixée en chaque point $\boldsymbol{x}$ de l'espace ; sa longueur et sa direction ne dépendent pas de l'observateur. En bref, le champ électrique $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x})$ est un champ *vectoriel*. Les expériences indiquent que la meilleure façon de le définir est la relation

$$q\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}) = m\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}) \tag{2}$$

considérée en chaque point $\boldsymbol{x}$ de l'espace. La définition du champ électrique s'appuie donc sur la manière dont il *déplace* des charges*. Le champ est mesuré en multiples de l'unité N/C ou V/m.

Défi 7 e

Pour décrire totalement le mouvement engendré par l'électricité, nous avons besoin d'une relation qui explicite comment des charges *produisent* des champs électriques. Cette relation fut établie avec précision (mais pas pour la première fois) par Charles-

* La définition du champ électrique donnée ici présume-t-elle l'existence d'une vitesse pour la charge qui soit beaucoup moins grande que celle de la lumière ?

Défi 6 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 5 Quelques champs électriques observés.

Observation	Champ électrique
Champ situé à 1 m d'un électron dans le vide	Défi 8 s
Valeurs de champs perçus par les requins	jusqu'à 0,1 μV/m
Bruit cosmique	10 μV/m
Champ d'un émetteur radio FM de 100 W distant de 100 km	0,5 mV/m
Champ à l'intérieur des conducteurs, comme les fils de cuivre	0,1 V/m
Champ situé juste en dessous d'une ligne à haute tension	0,1 à 1 V/m
Champ d'une antenne GSM située à 90 m	0,5 V/m
Champ à l'intérieur d'une maison standard	1 à 10 V/m
Champ d'une ampoule de 100 W à une distance de 1 m	50 V/m
Champ terrestre dans l'atmosphère de la Terre	100 à 300 V/m
Champ dans les nuages orageux	jusqu'à plus de 100 kV/m
Champ électrique maximal dans l'air avant que des étincelles surgissent	1 à 3 MV/m
Champs électriques dans les membranes biologiques	10 MV/m
Champs électriques dans les condensateurs	jusqu'à 1 GV/m
Champs électriques dans les impulsions laser pétawatt	10 TV/m
Champs électriques dans les noyaux des ions U^{91+}	1 EV/m
Champ électrique utile maximal dans le vide, limité par la production de paires d'électrons	1,3 EV/m
Champ électrique maximal possible dans la nature (champ électrique de Planck corrigé)	$2{,}4 \cdot 10^{61}$ V/m

Augustin de Coulomb dans son domaine privé, au cours de la Révolution française**. Il découvrit qu'autour de toute charge Q de petite taille ou sphérique, *au repos*, il y a un champ électrique. À la position $\boldsymbol{r}$, le champ électrique $\boldsymbol{E}$ est donné par

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\frac{\boldsymbol{r}}{r} \quad \text{où} \quad \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9{,}0\,\text{GV m/C}\,. \tag{3}$$

Par la suite, nous étendrons cette relation pour une charge en mouvement. La constante de proportionnalité étrange, bâtie autour de la *permittivité du vide* ε_0, est due à la manière historique dont l'unité de la charge fut initialement définie*. L'idée cruciale de la formule est la décroissance du champ avec le carré de la distance. Pouvez-vous imaginer quelle est l'origine de cette dépendance ? Défi 9 s

** Charles-Augustin de Coulomb (n. Angoulême 1736, d. Paris 1806) était un physicien et ingénieur français. Ses expériences méticuleuses sur les charges électriques ont fourni des bases solides pour l'étude de l'électricité.

* Des définitions différentes de celle-ci et d'autres constantes de proportionnalité que l'on rencontrera plus tard sont possibles, elles conduisent à des *systèmes d'unités* différents du Système international employé ici. Le SI est présenté en détail dans l'Annexe B. Parmi les concurrents plus anciens, le système d'unités de Gauss souvent utilisé dans les calculs théoriques, le système d'unités de Heaviside–Lorentz, le système

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 6 Propriétés du champ électrique : un vecteur (polaire).

Les champs électriques peuvent	Propriété physique	Dénomination mathématique	Définition
Attirer des corps	charges qui accélèrent	couplage	équation (3)
Repousser des corps	charges qui accélèrent	couplage	équation (3)
Être distingués	discernement	élément d'un ensemble	Page 180
Varier graduellement	continuum	espace vectoriel réel	Page 64, Page ??
Pointer quelque part	direction	espace vectoriel, nombre de dimensions	Page 64
Être comparés	mesurabilité	métricité	Page ??
Être ajoutés	additivité	espace vectoriel	Page 64
Avoir des angles définis	direction	espace vectoriel euclidien	Page 64
Dépasser toute limite	infini	infinitude	Page 181
Changer de direction sous la réflexion	polarisation	vecteur de parité impaire	
Conserver la direction sous le renversement du temps		vecteur temps pair	

Les deux équations précédentes nous permettent d'écrire l'interaction qui existe entre deux corps chargés, sous la forme

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}_1}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\frac{\boldsymbol{r}}{r} = -\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}_2}{\mathrm{d}t}\,, \tag{4}$$

où $\mathrm{d}\boldsymbol{p}$ représente la variation de la quantité de mouvement, et $\boldsymbol{r}$ est le vecteur reliant les deux centres de masse. Cette illustre expression qui décrit l'attraction et la répulsion électrostatique, également due à Coulomb, n'est valable que pour des corps chargés qui sont de petite taille ou sphériques, et par-dessus tout qui sont *au repos*.

Les champs électriques accélèrent des charges. Par conséquent, dans la vie courante, ils possèdent deux propriétés principales : ils contiennent de l'énergie et ils peuvent polariser les corps. Le contenu en énergie est dû à l'interaction électrostatique entre les charges. L'intensité de cette interaction est considérable. Par exemple, elle est le fondement de la force qu'exercent nos muscles. La force musculaire est un effet macroscopique de l'équation 4. La dureté matérielle de l'acier ou du diamant en représente un autre exemple. Comme nous le découvrirons, tous les atomes se retiennent ensemble par l'attraction électrostatique. Pour vous convaincre de la forte intensité de l'attraction électrostatique, répondez à la question suivante : quelle est la force qui s'exerce entre deux
Défi 10 s boîtes contenant un gramme de protons chacune, situées sur les deux pôles terrestres ? Essayez de deviner le résultat avant de calculer cette valeur surprenante.

Réf. 7 d'unités électrostatiques et le système d'unités électromagnétiques en sont les plus importants.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La relation de Coulomb pour le champ régnant autour d'une charge peut être reformulée d'une manière qui permette de la généraliser aux corps non sphériques. Prenez une surface fermée, c'est-à-dire une surface qui enveloppe un certain volume. Alors l'intégrale du champ électrique sur cette surface, le flux électrique, est la charge enveloppée Q divisée par ε_0 :

$$\int_{\text{surfacefermée}} \boldsymbol{E}\, \mathrm{d}\boldsymbol{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \,. \tag{5}$$

Cette relation mathématique, dénommée la « *loi* » *de Gauss*, découle du résultat de Coulomb. (Dans la forme simplifiée donnée ici, elle n'est valide que pour des situations statiques.) Puisqu'à l'intérieur des conducteurs le champ électrique est nul, la « loi » de Gauss implique, par exemple, que si une charge q est encerclée par une sphère métallique non chargée, alors la surface externe de la sphère métallique exhibe une charge identique q.

Défi 11 s

Défi 12 e

En raison de l'intensité des interactions électromagnétiques, il n'est pas aisé de dissocier les charges. C'est la raison pour laquelle les effets électriques n'ont été utilisés dans un but pratique, de manière répandue, que depuis une centaine d'années environ. Nous avons dû patienter avant que des dispositifs utiles et exploitables soient inventés pour séparer les charges et pour les mettre en mouvement. Bien évidemment, cela requiert de l'énergie. Les batteries, que l'on trouve dans les téléphones portables, utilisent de l'énergie chimique pour parvenir à cette fin*. Les éléments thermoélectriques, que l'on rencontre dans certaines montres, tirent profit de la différence de température entre le poignet et l'air pour séparer les charges, les cellules solaires emploient la lumière, et les dynamos ou les générateurs de Kelvin utilisent l'énergie cinétique disponible.

Les corps non chargés en attirent-ils d'autres ? En première approximation, ils ne le font pas. Mais lorsque nous examinons cette question plus attentivement, nous découvrons qu'ils peuvent en attirer d'autres. Pouvez-vous trouver quelles sont les conditions nécessaires pour que cela puisse se produire ? En fait, les conditions requises sont plutôt déterminantes, puisque notre propre chair, qui est constituée de molécules neutres, se maintient de cette manière.

Défi 14 s

Qu'est-ce alors que l'électricité ? La réponse est simple : *l'électricité ne désigne rien de particulier*. C'est le nom attribué à un domaine de recherche, mais non celui d'une quelconque observation ou effet explicite. L'électricité ne désigne ni le courant électrique, ni les charges électriques, ni le champ électrique. L'électricité n'est pas un terme spécifique, elle s'applique *à l'ensemble* de ces phénomènes. En fait, ce problème de terminologie masque une question plus profonde qui demeure sans réponse en ce début de vingt et unième siècle : quelle est la nature de la charge électrique ? Afin d'étudier cette énigme, nous allons commencer avec la question qui suit.

Pouvons-nous déceler l'inertie de l'électricité ?

Si la charge électrique est réellement quelque chose qui *s'écoule* dans les métaux, nous devrions être capables d'observer les effets indiqués sur la Figure 9. Maxwell avait prédit la plupart de ces effets : la charge électrique devrait tomber, avoir une certaine inertie et

Défi 13 s

* À ce propos, les batteries sont-elles des sources émettant des charges ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

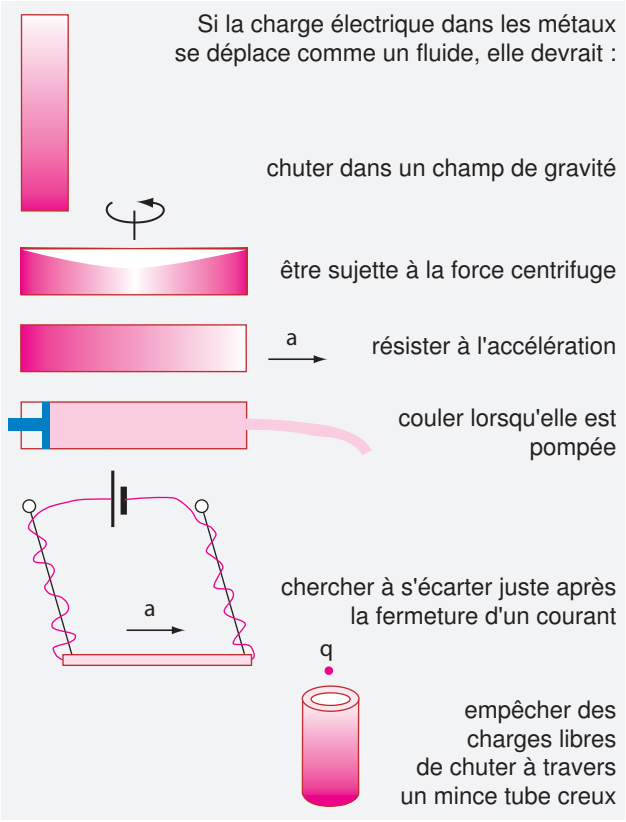


FIGURE 9 Conséquences de l'écoulement de l'électricité.

être séparable de la matière. En réalité, chacun de ces effets a été observé**. Par exemple, lorsqu'une longue tige métallique est maintenue verticalement, nous pouvons mesurer une différence de potentiel électrique, une tension électrique, entre le sommet et la base. Autrement dit, nous pouvons mesurer le *poids* de l'électricité de cette manière. De façon similaire, nous pouvons mesurer la différence de potentiel entre les extrémités d'une tige
Réf. 8 en accélération. D'autre part, nous pouvons mesurer la différence de potentiel qui existe entre le centre et la bordure d'un disque métallique en rotation. En fait, c'est grâce à cette dernière expérience que le rapport q/m des courants dans les métaux fut mesuré avec précision pour la première fois. Le résultat donne

$$q/m = 1{,}8 \cdot 10^{11}\ \mathrm{C/kg} \tag{6}$$

pour tous les métaux, aux petites variations près dans le chiffre après la virgule. En bref, le courant électrique possède une masse. Par conséquent, à chaque fois que nous établissons un courant électrique, nous observons un *recul* du dispositif. Cet effet élémentaire
Réf. 9 peut facilement être mesuré et permet de confirmer le rapport charge sur masse que nous venons de citer. La production de courant dans l'air ou dans le vide est également obser-

** Maxwell réalisa également des expériences pour détecter ces effets (excepté le dernier, qu'il n'avait pas prévu), mais ses appareils n'étaient pas assez sensibles.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vée ; en fait, chaque tube de téléviseur utilise ce principe pour créer le faisceau produisant l'image sur l'écran. Il fonctionne mieux pour des objets métalliques ayant des extrémités
Réf. 10 pointues et affilées. Les rayons créés de cette façon – nous pourrions dire qu'ils représentent de l'électricité « libre » – sont appelés *rayons cathodiques*. À quelques pour cent près, ils dénotent un rapport charge sur masse identique à l'expression (6). Cette coïncidence montre donc que les charges se déplacent presque aussi librement dans les métaux que dans l'air : c'est la raison pour laquelle les métaux sont de si bons conducteurs.

Si la charge électrique *chute* à l'intérieur des tiges métalliques verticales, nous pouvons énoncer la déduction stupéfiante que les rayons cathodiques – comme nous le verrons plus tard, ils sont constitués d'électrons libres* – ne devraient pas être capables de chuter à travers un tube métallique vertical. Cela est dû à la compensation exacte entre l'accélération due au champ électrique engendré par l'électricité déplacée dans le tube et l'accélération de la gravité. Donc les électrons ne devraient pas pouvoir chuter à travers
Défi 15 e un cylindre long et fin. Ce ne serait pas le cas si l'électricité dans les métaux ne se com-
Réf. 11 portait pas comme un fluide. En réalité, l'expérience a été effectuée, et une diminution de 90 % de l'accélération de la chute libre pour les électrons a été constatée. Pouvez-vous
Défi 16 s imaginer pourquoi la valeur idéale de 100 % n'est pas constatée ?

Si le courant électrique se comporte comme un liquide, nous devrions être capables de mesurer sa vitesse. Le premier à l'avoir fait, en 1834, fut Charles Wheatstone. Dans une expérience restée célèbre, il utilisa un fil métallique d'un quart de mille de longueur (soit approximativement 400 mètres), pour produire trois étincelles : une au point de départ, une au milieu et une à l'extrémité finale. Il installa alors un miroir à mouvement rapide sur une montre mécanique. En notant la valeur à laquelle les trois images d'étincelles sur un écran étaient décalées l'une par rapport aux autres, il détermina que la vitesse valait 0,45 Gm/s, bien que la marge d'erreur fût considérable. Des relevés ultérieurs plus précis indiquèrent que la vitesse est toujours inférieure à 0,3 Gm/s, et qu'elle dépend du métal utilisé et de la technique d'isolation du câble. La valeur élevée de la vitesse convainquit de nombreuses personnes à employer l'électricité pour transmettre des messages. Une version moderne de l'expérience, pour les inconditionnels de l'informatique, utilise la
Réf. 12 commande « ping » tapée à partir d'un système d'exploitation UNIX. Cette commande mesure le temps que met un signal d'un ordinateur pour atteindre un autre ordinateur et revenir à l'expéditeur. Si la longueur du câble reliant deux machines est connue, la
Défi 17 e vitesse du signal peut être déduite. Essayez.

Remarque : la vitesse de l'électricité est trop lente pour de nombreuses personnes. Les ordinateurs modernes qui sont connectés aux Bourses mondiales sont situés aussi près que possible de la Bourse, parce que le gain de temps qu'une distance de communication courte fournit est substantiel pour obtenir de bonnes performances financières sur
Réf. 13 certains marchés d'échange.

* Le mot « électron » est dû à George Stoney. Les électrons sont les charges les plus petites et les plus légères qui se déplacent dans les métaux, ils représentent généralement – mais pas toujours – les « atomes » d'électricité, par exemple dans les éléments métalliques. Leur charge est minuscule, 0,16 aC, de telle sorte que les flux de charge caractéristiques de la vie quotidienne sont constitués d'énormes quantités d'électrons. Par conséquent, la charge électrique se comporte comme un fluide continu. Cette particule elle-même fut découverte et révélée en 1897 par le physicien prussien Johann Emil Wiechert (1861–1928) et de manière indépendante, trois mois plus tard, par le physicien anglais Joseph John Thomson (1856–1940).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 7 Quelques valeurs observées de courant électrique.

Observation	Courant
Plus petit courant jamais mesuré (pour un électron en mouvement)	3 aA
Signaux de nerfs humains	20 µA
Courant mortel pour les êtres humains	aussi faible que 20 mA, typiquement 100 mA
Courant consommé par un moteur de train	600 A
Courant dans un éclair	10 à 100 kA
Courant le plus élevé produit par l'homme	20 MA
Courant à l'intérieur de la Terre	autour de 100 MA

TABLEAU 8 Quelques détecteurs de courant électrique.

Mesure	Détecteur	Étendue
Chute de tension due à une résistance	multimètre à 20 euros	jusqu'à env. 3 A
Contraction	muscles humains	ressentie à partir de 0,1 mA
Émission de fumée	muscles humains	à partir de 1 A
Variation du rythme	cœur humain	cesse à 20 mA
Plantes		

En résumé, les expériences montrent que toutes les charges possèdent une masse. Et comme tout corps massif, elles se déplacent moins vite que la lumière.

Subir les effets des champs électriques

Pourquoi l'électricité est-elle dangereuse pour les hommes ? La principale raison est que le corps humain est lui-même contrôlé par des « fils électriques ». Ainsi, l'électricité externe interfère avec les signaux internes. Nous savons cela depuis 1789. Cette année-là, le médecin italien Luigi Galvani (1737–1798) découvrait que le courant électrique fait contracter les muscles d'un animal mort. La toute première expérience célèbre utilisait des cuisses de grenouilles : quand de l'électricité était appliquée, elles se convulsaient violemment. Des recherches ultérieures confirmèrent que tous les nerfs utilisent des signaux électriques. Les nerfs sont les « câbles de commande » des animaux. Cependant, ils ne sont pas en métal : les métaux ne sont pas assez flexibles. Par conséquent, les nerfs ne conduisent pas l'électricité en utilisant des électrons mais plutôt des *ions*. Ces particularités raffinées furent éclaircies au vingtième siècle seulement. Les signaux nerveux se propagent en utilisant le mouvement des ions sodium et potassium situés dans la membrane des cellules nerveuses. La vitesse du signal résultant de ce mouvement est comprise entre 0,5 m/s et 120 m/s, en fonction du type de nerf. Cette vitesse est suffisante pour la survie de la plupart des espèces – le signal ordonne au corps de s'enfuir en cas de danger.

Étant électriquement commandés, tous les mammifères peuvent ressentir les champs

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

électriques puissants. Les êtres humains peuvent ressentir des champs à partir de 10 kV/m environ, valeur pour laquelle les cheveux se hérissent. Au contraire, plusieurs animaux peuvent ressentir des champs électriques et magnétiques particulièrement faibles. Les requins, par exemple, peuvent déceler des champs aussi faibles que 1 µV/m en tirant profit d'organes sensitifs spécifiques, les *ampoules de Lorenzini*, qui se trouvent autour de leur gueule. Les requins les utilisent pour détecter le champ engendré par leurs proies se déplaçant dans l'eau, et peuvent ainsi les repérer même dans l'obscurité. Plusieurs poissons d'eau douce, la salamandre et l'ornithorynque, le célèbre mammifère semi-aquatique à bec de canard, peuvent également ressentir des champs électriques. Comme les requins, ils les utilisent pour repérer leurs proies dans une eau qui est trop boueuse pour y voir clair. Certains poissons, que l'on appelle *poissons électriques*, produisent même un faible champ afin d'améliorer la détection des proies*.

Aucun animal terrestre ne possède de capteur particulier pour les champs électriques, parce que tout champ électrique aérien est fortement amorti lorsqu'il rencontre un corps animal empli d'eau. En réalité, l'atmosphère qui nous entoure possède un champ électrique d'environ 100 V/m ; à l'intérieur du corps humain ce champ s'atténue jusqu'aux échelles de quelques µV/m, ce qui est très inférieur aux champs électriques internes des animaux. En d'autres termes, les hommes ne sont pas affublés de capteurs pour les faibles champs électriques parce qu'ils sont des animaux terrestres. (Les hommes ont-ils l'aptitude à ressentir des champs électriques dans l'eau ? Il semble que personne ne le sache.) Néanmoins, il existe quelques exceptions. Sachez que certaines personnes âgées peuvent ressentir l'approche des orages, dans leurs articulations. Cela est dû à la coïncidence qui existe entre la fréquence du champ électromagnétique émis par les nuages lourdement chargés – autour de 100 kHz – et la fréquence de résonance des membranes des cellules nerveuses.

Défi 18 r

Page 80

Le contenu aqueux du corps humain signifie également que, dans la nature, les champs électriques que nous rencontrons dans l'air sont rarement dangereux pour les êtres humains. Dès que des hommes ressentent des champs électriques, comme lorsque des tensions élevées font hérisser les cheveux, la situation est potentiellement dangereuse.

La forte impédance de l'air signifie également que, dans le cas de champs électromagnétiques variables dans le temps, les hommes sont beaucoup plus enclins à être affectés par la composante magnétique que par la composante électrique.

Aimants

L'étude du magnétisme a progressé à travers le monde indépendamment de l'étude de l'électricité. Vers la fin du douzième siècle, la boussole fut introduite en Europe. Cette époque vit naître des débats houleux concernant le fait de savoir si elle indiquait le nord ou le sud. En 1269, l'ingénieur militaire français Pierre de Maricourt (1219–1292) publia son travail sur les matériaux magnétiques. Il releva que chaque aimant possède *deux* points de plus forte aimantation, qu'il appela les *pôles*. Il remarqua que, même si un aimant est coupé, les morceaux résultants conservent toujours deux pôles : l'un pointe vers le nord et l'autre vers le sud lorsque la pierre est libre de tourner. Les aimants sont des

Réf. 14

* Il a fallu attendre l'an 2000 pour que la technologie nous permette d'utiliser ce même effet. De nos jours, les détecteurs des airbags dans les voitures utilisent souvent des champs électriques pour détecter si la personne assise sur le siège est un enfant ou un adulte, modifiant ainsi la façon dont l'airbag agit lors d'un accident.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

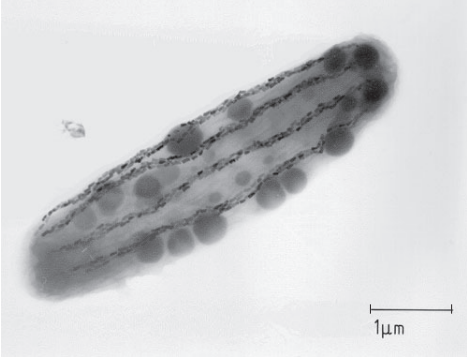


FIGURE 10 La bactérie magnétotactique *Magnetobacterium bavaricum* avec ses magnétosomes. (© Marianne Hanzlik)

dipôles. Les atomes sont soit dipolaires, soit non magnétisés. Il n'existe aucun monopôle magnétique. Malgré la promesse de renommée éternelle, aucun monopôle magnétique n'a été découvert jusqu'à présent, comme l'indique le Tableau 1. De même que les pôles se repoussent, et qu'ils ne s'attirent pas.

Les aimants possèdent une deuxième propriété : ils transforment les matériaux non magnétiques en matériaux magnétiques. Il existe donc également une polarisation magnétique, analogue à la polarisation électrique. Contrairement à l'électricité, certains matériaux magnétiques conservent la polarisation magnétique induite : ils deviennent aimantés. Cela survient lorsque les atomes du matériau sont alignés par l'aimant externe.

Les hommes peuvent-ils ressentir les champs magnétiques ?

> « Un imbécile peut poser à lui seul plus de questions que sept sages ensemble ne pourraient en résoudre. »
>
> Antiquité

Réf. 15 Il est notoire que les abeilles, les requins, les pigeons, les saumons, les truites, les tortues de mer et certaines bactéries peuvent ressentir des champs magnétiques. Nous parlons dans ce cas de la capacité de magnétoréception. Toutes ces formes de vie font usage de cette aptitude pour la navigation. La méthode de détection la plus commune consiste à tirer profit de minuscules particules magnétiques situées à l'intérieur d'une cellule. La cellule perçoit alors comment ces petits aimants intégrés se disposent dans un champ magnétique. Ces aimants sont microscopiques, typiquement d'une taille d'environ 50 nm. Ceux-ci sont utilisés pour naviguer le long du champ magnétique de la Terre. Chez les animaux plus évolués, les variations du champ magnétique terrestre, de 20 à 70 µT, dessinent un paysage analogue à celui que les hommes perçoivent avec leurs yeux. Ils peuvent le mémoriser et l'utiliser pour la navigation.

Les êtres humains peuvent-ils percevoir les champs magnétiques ? Des matériaux magnétiques semblent être présents dans le cerveau humain, mais nous ne pouvons toujours pas définitivement répondre à cette question. Peut-être pouvez-vous concevoir une mé-
Défi 19 r thode permettant de le vérifier ?

Le magnétisme et l'électricité sont-ils reliés ? François Arago* découvrit qu'ils le sont.

* Dominique-François Arago (1786–1853) était un physicien français.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

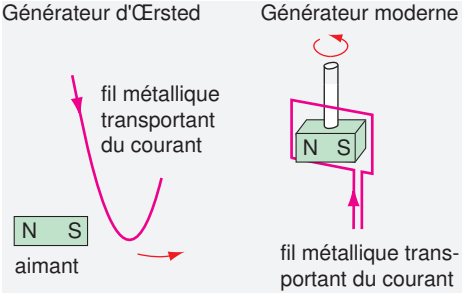


FIGURE 11 Une version ancienne, et une autre plus récente, d'un moteur électrique.

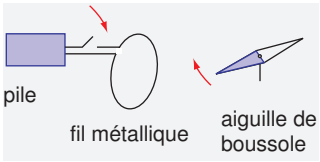


FIGURE 12 Un courant électrique engendre toujours un champ magnétique.

Il avait observé qu'un navire frappé par la foudre pendant un violent orage était dans l'obligation d'utiliser une nouvelle boussole. Donc la foudre possède l'aptitude de démagnétiser les boussoles. Arago savait, comme Franklin, que l'éclair est un phénomène électrique. Autrement dit, l'électricité et le magnétisme doivent être reliés. Plus exactement, le magnétisme doit être associé à l'électricité *en mouvement*.

Comment pouvons-nous concevoir un générateur ?

> « Le communisme, c'est le pouvoir des soviets plus l'électrification du pays tout entier. »
>
> Lénine*

L'explication de cette célèbre sentence de Lénine a trait à deux découvertes. L'une d'entre elles fut réalisée en 1820 par le physicien danois Hans Christian Œrsted (1777–1851) et l'autre en 1831 par le physicien anglais Michael Faraday**. Les conséquences de ces expériences changèrent radicalement la face du monde en moins d'un siècle.

Le 21 juillet 1821, Œrsted publia un feuillet, en latin, qui déchaîna toute l'Europe. Il avait trouvé (lors d'une conférence faite à ses étudiants) que, lorsqu'un courant est envoyé à travers un fil, un aimant situé à proximité est mis en mouvement. Autrement dit, il avait découvert que la circulation du courant électrique peut mettre des corps en mouvement.

Des expériences ultérieures démontrèrent que *deux* fils métalliques dans lesquels les charges s'écoulent s'attirent ou se repoussent l'un et l'autre, selon que les courants sont

* Lénine (n. Simbirsk 1870, d. Gorki 1924), fondateur de l'Union des républiques socialistes soviétiques, fit cette déclaration en 1920 comme point d'orgue de son plan de développement pour le pays. En Russie, les conseils ouvriers de l'époque étaient dénommés des soviets.

** Michael Faraday (n. Newington 1791, d. Londres 1867) fut élevé dans une famille modeste, sans recevoir d'éducation, et fut profondément imprégné d'idées religieuses. À l'adolescence, il devint assistant du plus célèbre chimiste de son temps, Humphry Davy (1778–1829). Il n'avait aucune formation mathématique, mais plus tard au cours de sa vie il devint membre de la Royal Society. Il déclina sans prétention durant sa vie tous les autres honneurs. Il travailla sur des sujets de chimie, sur la structure atomique de la matière et, par-dessus tout, il développa l'idée des champs (magnétiques) et des lignes du champ. Il utilisait les champs pour décrire ses nombreuses découvertes expérimentales concernant l'électromagnétisme, tel l'effet Faraday. Les champs furent ensuite décrits mathématiquement par Maxwell, qui était à cette époque la seule personne en Europe à saisir l'importance du concept de champ de Faraday.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

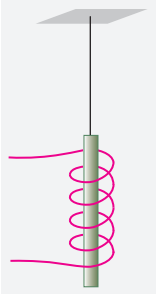


FIGURE 13 Le courant fait tourner une tige métallique.

parallèles ou antiparallèles. Ces expériences ainsi que d'autres révèlent que les fils dans lesquels l'électricité circule se comportent comme des aimants*. En d'autres termes, Œrsted avait mis la main sur la pièce à conviction décisive qui prouvait que l'électricité pouvait être transformée en magnétisme.

Peu de temps après, Ampère** découvrit que les *bobines métalliques* accroissent considérablement ces effets. Les bobines agissent comme des petits aimants. En particulier, celles-ci, comme les champs magnétiques, possèdent toujours deux pôles, généralement dénommés le pôle nord et le pôle sud. Des pôles opposés s'attirent, des pôles identiques se repoussent. Comme nous le savons tous, la Terre est elle-même un énorme aimant dont le pôle Nord magnétique est situé près de son pôle Sud géographique, et vice versa. (Le champ magnétique de la Terre n'est *pas* engendré par un aimant permanent solide qui serait situé à l'intérieur de celle-ci. Le cœur solide de la Terre est trop chaud pour être un aimant permanent ; au lieu de cela, ce champ magnétique est dû aux courants de convection qui se produisent dans le noyau externe, liquide.)

Une charge électrique mobile engendre des champs magnétiques. Ce résultat explique pourquoi les champs magnétiques ont toujours deux pôles. L'inexistence des monopôles magnétiques devient alors évidente. Mais une interrogation intrigante demeure : si les champs magnétiques sont dus au mouvement des charges, cela devrait également être le cas pour un aimant ordinaire. Cela peut-il être démontré ?

En 1915, deux hommes aux Pays-Bas mirent au jour un procédé élémentaire pour démontrer que, même dans un aimant, quelque chose est en mouvement. Ils suspendirent une tige métallique avec un mince fil accroché au plafond et placèrent alors une bobine tout autour de la tige, comme indiqué sur la Figure 13. Ils prévoyaient que les courants

* En réalité, si nous imaginons que de minuscules courants se déplacent en formant des cercles à l'intérieur des aimants, nous obtenons une description unifiée pour tous les champs magnétiques observés dans la nature.

** André-Marie Ampère (n. Lyon 1775, d. Marseille 1836) était un physicien et mathématicien français. Autodidacte, il aurait lu la célèbre *Encyclopédie* dès son enfance. Dans une vie emplie de tragédies personnelles, il déambula entre les mathématiques, la chimie et la physique, travailla comme professeur de lycée, sans rien publier de significatif avant 1820. La découverte d'Œrsted se répandit alors dans toute l'Europe : le courant électrique peut faire dévier les aiguilles magnétiques. Ampère travailla pendant des années sur ce problème et publia en 1826 les résultats de ses recherches, ce qui conduisit Maxwell à le surnommer le « Newton de l'électricité ». Ampère identifia et développa plusieurs domaines de l'électrodynamique. En 1832, son technicien et lui construisirent également la première dynamo, ou générateur rotatif de courant électrique. Bien évidemment, l'unité du courant électrique est nommée en son honneur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

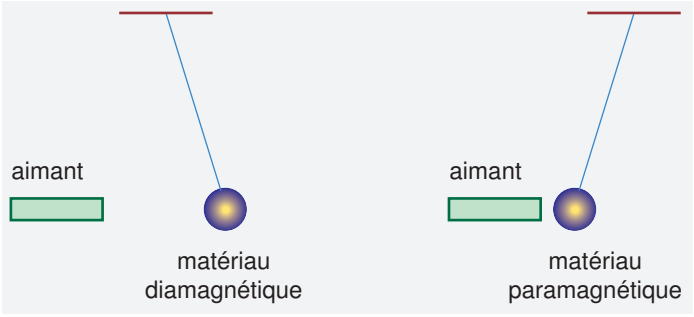


FIGURE 14 Les deux variantes élémentaires de comportement des matériaux magnétiques (dans un champ non homogène) : le diamagnétisme et le paramagnétisme.

infimes situés à l'intérieur de la tige seraient alignés par le champ magnétique de la bobine. Par conséquent, ils s'attendaient à ce qu'un courant traversant la bobine fît tourner la tige sur elle-même. Et en effet, lorsqu'ils envoyèrent un courant puissant dans la spi-
Réf. 16 rale, la tige tourna. (À cause du courant, la tige était aimantée.) Aujourd'hui, cet effet est appelé *effet Einstein–de Haas* d'après les deux physiciens qui l'imaginèrent, le quantifièrent et l'expliquèrent*. Cet effet montre donc que, même dans le cas d'un aimant permanent, le champ magnétique est engendré par le mouvement interne des charges. L'amplitude de cet effet indique également que les particules en mouvement sont des électrons. (Douze ans plus tard, il devint évident que le moment cinétique des électrons, responsable de cet effet, est un amalgame du moment cinétique de spin et du moment cinétique orbital, en fait le spin de l'électron joue un rôle primordial dans celui-ci.)

Puisque le magnétisme est dû à l'alignement des mouvements microscopiques de rotation, on peut conjecturer l'existence d'un effet encore plus surprenant. Le simple fait de faire tourner un matériau ferromagnétique** devrait l'aimanter, parce que les minus-
Réf. 17 cules courants rotatifs seraient alors alignés avec l'axe de rotation. Cet effet a vraiment été observé : il est dénommé *effet Barnett*, d'après le nom de son découvreur. Comme l'effet Einstein–de Haas, l'effet Barnett peut aussi être employé pour déterminer le rapport
Page ?? gyromagnétique de l'électron. Il démontre ainsi également que les spins des électrons jouent (généralement) un rôle plus important dans le magnétisme que leurs moments cinétiques orbitaux.

Champs magnétiques

Les expériences indiquent que le champ magnétique possède toujours une direction fixée dans l'espace, et une grandeur commune pour tous les observateurs (au repos), quelle que soit leur orientation. Nous sommes tentés de décrire le champ magnétique par un vecteur. Cependant, ce serait incorrect puisqu'un champ magnétique ne se comporte pas comme une flèche lorsqu'il est disposé devant un miroir. Imaginez qu'un système

* Wander Johannes de Haas (1878–1960) était un physicien hollandais. De Haas est mieux connu pour deux effets magnétoélectriques supplémentaires qui prirent son nom, l'effet Shubnikov–de Haas (la forte augmentation de la résistance magnétique du bismuth à basse température et dans des champs magnétiques puissants) et l'effet de Haas–Van Alphen (la susceptibilité diamagnétique du bismuth à basse température est une fonction périodique du champ magnétique).

** Un matériau ferromagnétique est un type particulier de matériau paramagnétique qui possède une aimantation permanente.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 9 Propriétés du champ magnétique : un vecteur axial.

Les champs magnétiques peuvent	Propriété physique	Dénomination mathématique	Définition
Attirer les courants	déviation de charges	couplage	équation (8)
Repousser les courants	déviation de charges	couplage	équation (8)
Être distingués	discernement	élément d'un ensemble	Page 180
Varier graduellement	continuum	espace vectoriel réel	Page 64, Page ??
Pointer quelque part	direction	espace vectoriel, nombre de dimensions	Page 64
Être comparés	mesurabilité	métricité	Page ??
Être ajoutés	additivité	espace vectoriel	Page 64
Avoir des angles définis	direction	espace vectoriel euclidien	Page 64
Dépasser toute limite	infini	infinitude	Page 181
Conserver la direction sous la réflexion	axialité	vecteur de parité paire, pseudovecteur	
Changer de direction sous le renversement du temps	axialité	vecteur non apparié en fonction du temps	

produise un champ magnétique orienté vers la droite. Vous pouvez considérer n'importe quel système : une bobine, une machine, etc. Maintenant, construisez ou imaginez un deuxième système qui soit l'image exacte dans un miroir du premier : une bobine miroir, une machine miroir, etc. Le champ magnétique engendré par le système miroir n'est pas orienté vers la gauche, comme vous l'attendiez probablement : il pointe toujours vers
Défi 20 e la droite. (Vérifiez-le.) En termes simples, les champs magnétiques *ne* se conduisent *pas* comme les flèches.

Autrement dit, il n'est pas parfaitement correct de décrire un champ magnétique par un vecteur $\boldsymbol{B} = (B_x, B_y, B_z)$, car les vecteurs agissent comme des flèches. Nous parlons dans ce cas de *pseudovecteur* : le moment cinétique et le couple représentent également des exemples de ces quantités. La méthode rigoureuse consiste à décrire le champ magnétique par la quantité*

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} 0 & -B_z & B_y \\ B_z & 0 & -B_x \\ -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}, \tag{7}$$

que nous appelons un *tenseur antisymétrique*. En résumé, les *champs magnétiques* sont définis par l'accélération qu'ils communiquent à des charges en mouvement. Il apparaît

* La quantité $\boldsymbol{B}$ n'était pas appelée « champ magnétique » jusqu'à récemment. Nous suivons ici la définition moderne, logique, qui remplace la traditionnelle, dans laquelle $\boldsymbol{B}$ était appelé « densité du flux magnétique » ou « induction magnétique » et une autre quantité, $\boldsymbol{H}$, était dénommée – de manière incorrecte, mais durant plus d'un siècle – le champ magnétique. Cette quantité $\boldsymbol{H}$ n'apparaîtra pas au cours de cette promenade, mais elle a un rôle prépondérant dans la description du magnétisme des matériaux.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 10 Quelques détecteurs du champ magnétique.

Mesure	Détecteur	Étendue
Tension	sonde de Hall	jusqu'à env. ... T
Stimulation de la croissance osseuse	piézoélectricité des os	à partir de ...
Force électromotrice induite (tension)	nerfs	à partir de 5 T ?
Sensations dans le thorax et les épaules	nerfs	gradients fortement variables
Plantes		

que cette accélération vérifie

$$\boldsymbol{a} = \frac{e}{m}\boldsymbol{v}\boldsymbol{B} = \frac{e}{m}\boldsymbol{v} \wedge \boldsymbol{B} \tag{8}$$

une relation que nous appelons souvent *accélération de Lorentz*, du nom de l'important physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz (n. Arnhem 1853, d. Haarlem 1928) qui la formula clairement pour la première fois*. (Cette relation est également appelée *accélération de Laplace*.) L'unité du champ magnétique est dénommée tesla et est notée T. Nous avons les égalités $1\,\mathrm{T} = 1\,\mathrm{N\,s/C\,m} = 1\,\mathrm{V\,s/m^2} = 1\,\mathrm{V\,s^2/A\,m}$.

L'accélération de Lorentz est l'effet qui est à la base du fonctionnement de tout moteur électrique. Un moteur électrique est un appareil qui tire profit d'un champ magnétique le plus efficacement possible pour accélérer des charges circulant dans un fil métallique. Par le biais du mouvement des charges, le fil est alors également déplacé. L'électricité est ainsi transformée en magnétisme et ensuite en mouvement. Le premier moteur opérationnel a été construit en 1834.

Comme dans le cas de l'électricité, nous avons besoin de savoir comment la *puissance* d'un champ magnétique est déterminée. Des expériences telles que celle d'Œrsted montrent que le champ magnétique est engendré par des charges en mouvement, et qu'une charge qui se déplace avec une vitesse $\boldsymbol{v}$ produit un champ $\boldsymbol{B}$ donné par

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\, q\, \frac{\boldsymbol{v} \wedge \boldsymbol{r}}{r^3} \quad \text{où} \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}\,\mathrm{N/A^2}\,. \tag{9}$$

C'est ce que nous appelons le « *théorème* » *d'Ampère*. À nouveau, l'étrange facteur $\mu_0/4\pi$ est dû à la manière historique dont les unités électriques ont été définies. La constante μ_0, qui est appelée la *perméabilité du vide*, est définie par la fraction du nombre de newtons par ampère au carré citée dans la formule. Il est facile de voir que le champ magnétique possède une intensité donnée par $\boldsymbol{v}E/c^2$, où $\boldsymbol{E}$ est le champ électrique mesuré par un observateur se déplaçant *avec* la charge. C'est le premier indice qui révèle que le magnétisme est un effet relativiste.

Défi 22 e

* La définition du champ magnétique donnée ici suppose-t-elle que la vitesse d'une charge soit beaucoup plus petite que celle de la lumière ?

Défi 21 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nous remarquons que l'équation (9) n'est valide que pour des vitesses et des accélérations faibles. Pouvez-vous découvrir la formule générale ?

Défi 23 s

En 1831, Michael Faraday dévoila une pièce supplémentaire du puzzle, une pièce qui avait même échappé au grand Ampère. Il découvrit qu'un aimant *en mouvement* pouvait engendrer l'apparition d'un courant dans un circuit électrique. Le magnétisme peut donc être transformé en électricité. Cette découverte cruciale a permis la production de courant électrique par des générateurs, les *dynamos*, en utilisant la puissance mécanique de l'eau, du vent ou de la vapeur. En réalité, la première dynamo fut construite en 1832 par Ampère et son technicien. Les dynamos sonnèrent l'avènement de l'utilisation de l'électricité à travers le monde. Quelque part, derrière chaque prise de courant électrique, il y a une dynamo.

Des expériences supplémentaires montrent que les champs magnétiques aboutissent aussi à des champs électriques lorsque nous nous plaçons dans un référentiel en mouvement. Vous devriez pouvoir le vérifier sur tous les exemples cités dans les Figures 11 à 26. *Le magnétisme est en réalité de l'électricité relativiste*. Les champs électrique et magnétique sont partiellement transformés l'un en l'autre lorsque nous basculons d'un référentiel inertiel à l'autre. Ceux-ci se comportent donc comme l'espace et le temps, qui sont également mélangés lorsque nous passons d'un référentiel inertiel à l'autre. La théorie de la relativité restreinte nous enseigne ainsi qu'il doit y avoir une entité unique, un *champ électromagnétique*, qui les décrit tous les deux. En examinant cela plus en détail, nous remarquons que le champ électromagnétique $\boldsymbol{F}$ entourant des corps chargés doit être décrit par un quadri-*tenseur* antisymétrique

$$\boldsymbol{F}^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \text{ ou } \boldsymbol{F}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} . \quad (10)$$

Sans aucun doute, le champ électromagnétique F, et donc chaque composante de ces matrices, dépend de l'espace et du temps. Les matrices montrent que l'électricité et le magnétisme sont deux visages du même effet*. De surcroît, puisque les champs électriques n'apparaissent que dans la ligne du haut et dans la colonne la plus à gauche, ces expressions indiquent que dans la vie quotidienne, pour des vitesses faibles, l'électricité et le magnétisme *peuvent* être séparés. (Pourquoi ?)

Défi 24 s

L'influence globale des champs électrique et magnétique sur des charges fixes ou en mouvement est alors donnée par l'expression suivante pour la relation relativiste force–

* En réalité, la formule du champ contient presque partout l'expression $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ au lieu de la vitesse de la lumière c. Nous expliciterons les raisons de cette substitution bientôt.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

accélération $\boldsymbol{K} = m\boldsymbol{b}$:

$$
\begin{aligned}
& m\boldsymbol{b} = q\boldsymbol{F}u \quad \text{ou} \\
& m\,\frac{\mathrm{d}u^\mu}{\mathrm{d}\tau} = q\boldsymbol{F}^\mu{}_\nu u^\nu \quad \text{ou} \\
& m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} = q\begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ E_x/c & 0 & B_z & -B_y \\ E_y/c & -B_z & 0 & B_x \\ E_z/c & B_y & -B_x & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} \quad \text{ou} \\
& W = q\boldsymbol{E}\boldsymbol{v} \quad \text{et} \quad d\boldsymbol{p}/\mathrm{d}t = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \wedge \boldsymbol{B}) \,, \qquad (11)
\end{aligned}
$$

qui révèle comment le travail W et la tri-force $dp/\mathrm{d}t$ dépendent des champs électrique et magnétique. Ces quatre expressions décrivent la même chose ; la simplicité de la première explique pourquoi les matrices (10) du champ électromagnétique sont compliquées. En fait, la *relation de Lorentz* (11) étendue représente la *définition* du champ électromagnétique, puisque ce champ est défini comme étant cette « étoffe » qui accélère les charges. En particulier, tous les dispositifs qui mettent des charges en mouvement, tels que les batteries et les dynamos, ainsi que tous les dispositifs qui sont mis en mouvement par des flux de charges, tels que les moteurs électriques et les muscles, sont décrits par cette relation. C'est la raison pour laquelle celle-ci est généralement étudiée précocement, sous sa forme simple, dès le lycée. La relation de Lorentz décrit tous les cas dans lesquels le mouvement des objets peut être perçu à l'œil nu ou être ressenti par nos facultés sensorielles, comme le va-et-vient d'un moteur électrique dans un train à grande vitesse, dans un ascenseur ou dans une fraise dentaire, le mouvement de l'image générée par le faisceau d'électrons dans un tube de téléviseur, ou le voyage d'un signal électrique dans un câble et dans les nerfs du corps humain.

Réf. 18, Réf. 19

En résumé, nous remarquons que l'interaction qui a lieu entre les charges peut être décrite en deux phrases : *primo*, les charges sont affectées par les champs électriques et magnétiques, *secundo*, les charges produisent des champs électriques et magnétiques.

Champs électromagnétiques et Lagrangiens

Dans l'expression de l'accélération de Lorentz (11), quand l'indice d'une variable apparaît deux fois dans un terme, on sous-entend la sommation sur toutes les valeurs que peut prendre cet indice*. Le tenseur $\boldsymbol{F}$ du champ électromagnétique est un quadritenseur *antisymétrique*. (Pouvez-vous développer la relation qui existe entre $\boldsymbol{F}^{\mu\nu}$, $\boldsymbol{F}_{\mu\nu}$ et $\boldsymbol{F}^\mu{}_\nu$?) Comme n'importe quel tenseur de ce type, il possède deux invariants, c'est-à-dire deux propriétés déduites qui demeurent identiques pour chaque observateur : l'expression $B^2 - E^2/c^2 = \frac{1}{2}\mathrm{tr}\,\boldsymbol{F}^2$ et le produit $4\boldsymbol{E}\boldsymbol{B} = -c\ \mathrm{tr}\,\boldsymbol{F}^*\boldsymbol{F}$. (Pouvez-vous confirmer cela, en utilisant la définition de la trace comme étant la somme des éléments diagonaux ?)

Défi 25 pe

Défi 26 s

La première expression invariante, $B^2 - E^2/c^2 = \frac{1}{2}\mathrm{tr}\,\boldsymbol{F}^2$, se révèle être proportionnelle au lagrangien du champ électromagnétique. C'est un scalaire et il implique que si E est soit plus grand, soit plus petit, soit égal à cB pour un observateur, il l'est également pour tous les autres observateurs. Ce lagrangien peut être utilisé pour définir l'action, laquelle

* C'est ce que l'on appelle la « convention d'Einstein ». [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

peut être employée pour décrire le mouvement du champ électromagnétique en tirant profit du principe de moindre action. Vous pouvez vérifier vous-même que ce lagrangien permet effectivement de décrire le changement provoqué par l'évolution des champs électromagnétiques. Cette approche constitue une autre manière de déduire les équations de Maxwell du champ de l'électromagnétisme.

Défi 27 e

Le deuxième invariant du tenseur du champ électromagnétique, $4\boldsymbol{EB} = -c \operatorname{tr} \boldsymbol{F}^* \boldsymbol{F}$, est un pseudoscalaire. Il détermine si l'angle entre le champ électrique et le champ magnétique est aigu ou obtus pour tous les observateurs*.

L'application des effets électromagnétiques à la vie de tous les jours a permis de nous ouvrir à un monde que nous ne connaissions pas auparavant. La lumière électrique, les moteurs électriques, la radio, le téléphone, les rayons X, la télévision, et les ordinateurs ont radicalement bouleversé la société humaine en moins d'un siècle. Par exemple, l'installation de l'éclairage électrique dans les rues des grandes villes a pratiquement éradiqué les attaques nocturnes qui étaient auparavant si courantes. Tous les appareils électriques exploitent le fait que les charges peuvent circuler dans les métaux et, en particulier, que l'énergie électromagnétique peut être transformée :

— en énergie mécanique – comme dans les haut-parleurs, les moteurs, les cristaux piézoélectriques ;
— en lumière – comme dans les ampoules et les lasers ;
— en chaleur – comme dans les fours, les couvertures électriques et les théières ;
— en résultantes chimiques – comme dans l'hydrolyse, la charge des batteries et l'électrolyse ;
— en froid – comme dans les réfrigérateurs et les éléments Peltier ;
— en signaux de rayonnement – comme dans la radio et la télévision ;
— en information stockée – comme dans les mémoires magnétiques et dans les ordinateurs.

Comment les générateurs démontrent que la relativité est juste

> « La seule opération mathématique que j'ai effectuée au cours de ma vie fut de tourner la manivelle d'un calculateur. »
>
> Michael Faraday

* Il y a en réalité un troisième invariant de Lorentz, beaucoup moins connu. Il est spécifique au champ électromagnétique et c'est une combinaison du champ et de son potentiel vecteur :

$$\begin{aligned}\kappa_3 &= \frac{1}{2} A_\mu A^\mu \boldsymbol{F}_{\rho\nu} \boldsymbol{F}^{\nu\rho} - 2A_\rho \boldsymbol{F}^{\rho\nu} \boldsymbol{F}_{\nu\mu} A^\mu \\ &= (\boldsymbol{AE})^2 + (\boldsymbol{AB})^2 - |\boldsymbol{A} \wedge \boldsymbol{E}|^2 - |\boldsymbol{A} \wedge \boldsymbol{B}|^2 + 4\frac{\varphi}{c}(\boldsymbol{AE} \wedge \boldsymbol{B}) - (\frac{\varphi}{c})^2 (E^2 + B^2) \,. \qquad (12)\end{aligned}$$

Cette expression est un invariant (mais pas une jauge) de Lorentz ; le fait de savoir cela permet d'éclaircir des problèmes obscurs tels que l'inexistence d'ondes pour lesquelles les champs électrique et magnétique sont parallèles. En réalité, pour des ondes monochromatiques planes, les trois invariants *s'annulent* dans la jauge de Lorentz. Les quantités $\partial_\mu J^\mu$, $J_\mu A^\mu$ et $\partial_\mu A^\mu$ sont également des invariants de Lorentz. (Pourquoi ?) La dernière, l'indépendance par rapport au référentiel de la divergence du quadri-potentiel, reflète l'invariance par rapport au choix de la jauge. La jauge dans laquelle l'expression est fixée à zéro est appelée la *jauge de Lorentz*.

Réf. 20

Défi 28 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

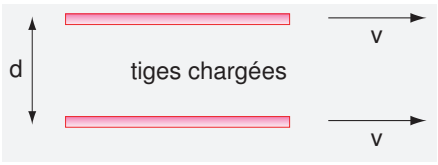


FIGURE 15 L'aspect relativiste du magnétisme.

Tous les moteurs électriques sont fondés sur le fait que les courants électriques interagissent avec les champs magnétiques. L'exemple le plus élémentaire est l'attraction que subissent deux fils transportant des courants parallèles. Cette observation seule, faite en 1820 par Ampère, est suffisante pour montrer qu'un mouvement plus grand qu'une certaine vitesse maximale est impossible à atteindre. Réf. 21

Cette argumentation est admirablement simpliste. Modifions l'expérience originale et imaginons deux longues tiges électriquement chargées, de masse m, se déplaçant dans la même direction avec une vitesse v, et situées à une distance d l'une de l'autre. Un observateur avançant avec les tiges observerait une répulsion électrostatique entre celles-ci donnée par Défi 29 e

$$ma_e = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\lambda^2}{d} \tag{13}$$

où λ représente la charge des tiges par unité de longueur. Un deuxième observateur *au repos* verrait deux effets : la répulsion électrostatique et l'attraction découverte par Ampère. Celui-ci remarque par conséquent que Défi 30 e

$$ma_{em} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\lambda^2}{d} + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{\lambda^2 v^2}{d} \,. \tag{14}$$

Cette expression doit rester cohérente avec l'observation du premier voyageur. C'est le cas uniquement si les deux observateurs notent la présence de répulsions. Il est facile de vérifier que le deuxième observateur constate, comme le premier, qu'il y a une répulsion si et seulement si

$$v^2 < \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0} \,. \tag{15}$$

Cette vitesse maximale, d'une valeur de 0,3 GM/s, est donc valide pour un objet quelconque transportant des charges. Mais *tous* les objets quotidiens contiennent des charges : il existe donc une vitesse maximale pour la matière.

Êtes-vous capable d'extrapoler l'argument de l'existence d'une vitesse maximale également aux particules neutres ? Dans quelques instants, nous en découvrirons davantage au sujet de cette vitesse limite. Défi 31 d

Voici à présent un autre argument qui assimile le magnétisme à un effet relativiste. Dans un fil où un courant électrique circule, la charge totale est nulle pour un observateur au repos par rapport au fil. L'explication en est que les charges entrent et sortent du fil au même moment pour cet observateur. Maintenant, imaginez un observateur qui voyage le long du fil. Les événements indiquant l'entrée et la sortie ne se produisent plus simultanément : le fil est chargé pour un observateur mobile. (Cette charge dépend de la

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 11 Valeurs de tensions électriques observées dans la nature.

Observation	Tension
Plus petite tension mesurée	env. 10 fV
Nerfs humains	70 mV
Pile de Volta	1 V
Cellule voltaïque (« pile électrique »)	1,5 V
Réseau électrique dans les foyers	230 V ou 110 V
Anguille électrique	100 à 600 V
Alimentation de tramway	500 V
Étincelles lorsque nous frottons un pull en polymère	1 kV
Clôture électrique	0,7 à 10 kV
Alimentation de train	15 kV
Bougie d'allumage dans les voitures	15 kV
Tube de téléviseur couleurs	30 kV
Tube à rayons X	30 à 200 kV
Microscope électronique	0,5 kV à 3 MV
Pistolet à impulsion électrique	65 à 600 kV
Coup de foudre	10 à 100 MV
Tension record d'accélérateur	1 TV
Tension de Planck, la valeur la plus élevée possible dans la nature	$1{,}5 \cdot 10^{27}$ V

direction du mouvement de l'expérimentateur.) En d'autres termes, si l'observateur lui-même était chargé, il ressentirait une certaine force. Les charges en mouvement subissent des forces de la part des fils qui transportent du courant. C'est précisément pour cette raison que les champs magnétiques ont été introduits : ils ne produisent des forces que sur des charges *en mouvement*. En bref, les fils métalliques dans lesquels circule un courant électrique sont entourés par des champs magnétiques.

Pour résumer, les effets électriques sont dus à la circulation de charges électriques et aux champs électriques, le magnétisme est engendré par le *déplacement* des charges électriques. Il n'est *pas* dû à des charges magnétiques*. La forte intensité du magnétisme, employée dans tout moteur électrique en fonctionnement, démontre que la relativité est juste : il existe une vitesse maximale dans la nature pour toutes les masses et charges. Les champs électrique et magnétique transportent tous les deux de l'énergie et de la quantité de mouvement. Ils constituent les deux faces d'une seule et même pièce de monnaie.

Trois réalités fondamentales concernant l'électricité

Les expériences que nous avons retracées jusqu'ici révèlent trois relations fondamentales :

▷ Les charges électriques exercent des forces sur les autres charges.

Page 124

* « Les électrons se déplacent dans les métaux à une vitesse d'environ 1 µm/s, donc si je marche à la même vitesse le long d'un câble dans lequel circule un courant continu, je ne devrais pas être en mesure de détecter un quelconque champ magnétique. » Qu'est-ce qui est faux dans cette affirmation ?

Défi 32 d

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

▷ Les charges électriques sont conservées.
▷ Les charges, comme toute matière, se déplacent plus lentement que la lumière.

À partir de ces trois affirmations – la définition de la charge, la conservation de la charge et l'invariance de la vitesse de la lumière –, nous pouvons déduire chaque aspect de l'électrodynamique classique. (L'inexistence de la charge magnétique est une hypothèse supplémentaire.) En particulier, on peut déduire les équations de Maxwell du champ de l'électrodynamique à partir de ces trois postulats. Les équations du champ décrivent la manière dont les charges *engendrent* un champ électromagnétique.

La démonstration de la relation qui existe entre la conservation de la charge et les équations du champ peut être donnée mathématiquement ; nous ne la présenterons pas ici, parce que l'algèbre sous-jacente est quelque peu compliquée. La relation essentielle est que toute l'électrodynamique découle des propriétés des charges que nous avons découvertes jusqu'à maintenant.

Réf. 22
Réf. 23

Curiosités et défis amusants sur les objets électriques et magnétiques

> « Et facta mirati, et intellecta assecuti*. »
> Augustin d'Hippone

Avant d'étudier plus en détail la dynamique d'un champ électromagnétique, amusons-nous avec l'électricité.

* *

De nos jours, il est simple de se divertir avec les étincelles. Les bobines Tesla, du nom de Nikola Tesla**, sont les dispositifs les plus simples qui permettent de produire de grandes étincelles chez soi. Attention : c'est dangereux, c'est la raison pour laquelle nous ne pouvons (pratiquement) pas nous procurer de tels dispositifs dans le commerce. Le schéma de base et un exemple sont indiqués sur la Figure 16. Les bobines Tesla ressemblent à de grands champignons métalliques (pour éviter d'avoir des décharges accidentelles), des plans pour leur construction peuvent être consultés sur de nombreux sites Web ou obtenus dans les nombreux clubs de passionnés, par exemple www.stefan-kluge.de.

* *

En 1722, George Graham découvrit, en observant une aiguille de boussole, que le champ magnétique de la Terre révèle des variations journalières. Pouvez-vous imaginer pourquoi ces fluctuations se produisent ?

Défi 33 s

* *

Si le fait même de frapper sur une porte en bois représente un effet électrique, nous de-

* « Admirer les miracles, et s'efforcer de comprendre. » Saint Augustin, sermon 98, § 3.
** Никола Тесла (Smiljan 1856–New York 1943) était un inventeur et ingénieur serbe. Il conçut et promut le système de courant alternatif polyphasé, le générateur électrique de courant alternatif, les communications sans fil, l'éclairage fluorescent et de nombreuses autres applications de l'électricité. Il est également un des pionniers de la radio. L'unité SI du champ magnétique est baptisée en son honneur. Personnage extravagant, ses idées étaient parfois irréalistes : par exemple, il pensait que les bobines Tesla pourraient être utilisées pour les transmissions électriques à distance.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

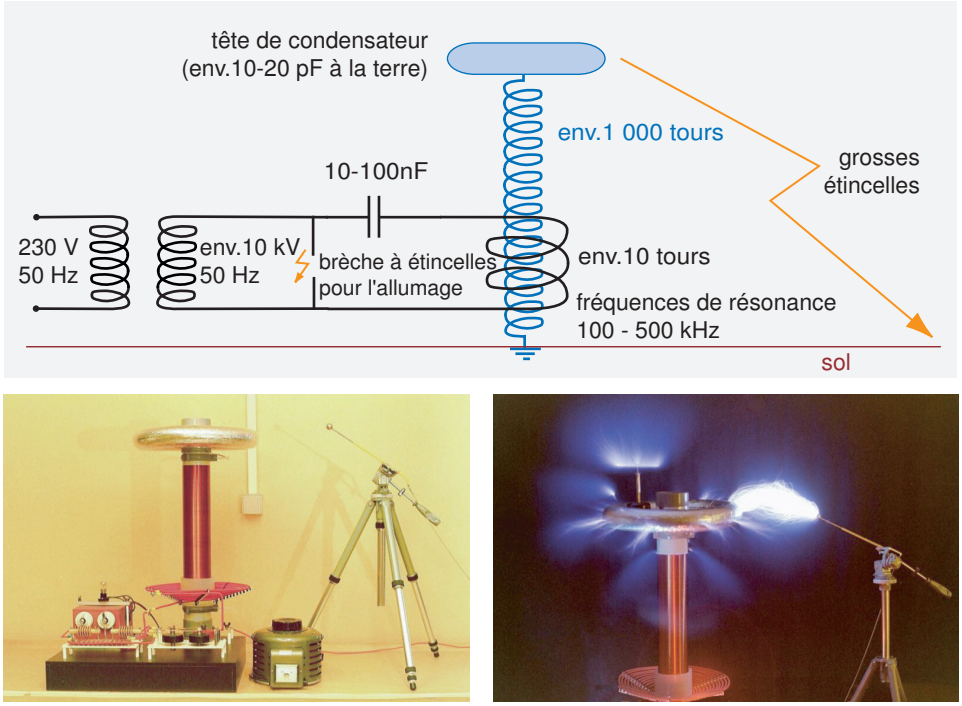


FIGURE 16 Le schéma, la mise en œuvre et le fonctionnement d'une bobine Tesla, faisant apparaître l'étincelle et la couronne de décharges. (photographies © Robert Billon)

vrions être capables de déceler des champs lorsque nous le faisons. Pouvez-vous conce-
Défi 34 d voir une expérience qui le vérifie ?

* *

Les oiseaux ne subissent aucune lésion lorsqu'ils se posent sur des lignes électriques non protégées. Néanmoins, nous n'observons presque jamais d'oiseaux sur les lignes à très haute tension de 100 kV ou plus, qui transportent l'électricité sur les longues distances.
Défi 35 s Pourquoi ?

* *

Qu'est-ce qui se passe sur la Figure 17 ? Pourquoi la plupart de ces photographies sont-
Défi 36 d elles prises par beau temps et avec des enfants blonds ?

* *

Comment pouvez-vous distinguer un aimant d'une barre métallique non aimantée de
Défi 37 s même taille et de même composition matérielle, en n'utilisant aucun procédé externe ?

* *

Comment brancheriez-vous une ampoule sur le réseau électrique ainsi que trois inter-
rupteurs de telle façon que la lumière puisse être allumée à l'aide de n'importe quel in-
Défi 38 s terrupteur et éteinte avec n'importe quel autre ? Et avec quatre interrupteurs ? Personne ne prendra au sérieux un physicien capable de retrouver les équations de Maxwell mais

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 17 Un effet courant dans les terrains de jeu. (© Evan Keller)

incapable de résoudre ce petit problème.

* *

Les premiers instruments construits pour générer des courants électriques furent les grosses machines à frottement. Ensuite, en 1799, le scientifique italien Alessandro Volta (1745–1827) inventa un nouveau dispositif pour générer l'électricité qu'il baptisa *pile*. Aujourd'hui, on l'appelle *cellule (voltaïque)*, *cellule primaire** ou, de manière moins appropriée, *batterie*. (À proprement parler, une batterie est un ensemble de cellules, comme celle que l'on trouve dans une voiture.) Les cellules voltaïques sont fondées sur des processus chimiques, elles fournissent beaucoup plus de courant et sont plus petites et plus faciles à manipuler que les machines électrostatiques. L'invention de la batterie bouleversa si profondément la recherche sur l'électricité que Volta devint mondialement célèbre. Finalement, une source élémentaire et fiable d'électricité était disponible pour la réalisation des expérimentations. Contrairement aux machines à frottement, les piles sont compactes, fonctionnent sous toutes les conditions atmosphériques et ne font pas de bruit.

Une pomme ou une pomme de terre avec un morceau de cuivre et un autre de zinc insérés à l'intérieur représente une des cellules voltaïques les plus simples possibles. Elle fournit une tension d'environ 1 V et peut être utilisée pour alimenter des horloges numériques ou pour produire des cliquetis dans les écouteurs. Volta fut également celui qui découvrit la loi de la charge électrique $q = CU$ des condensateurs (C étant la capacité électrique et U la tension), et fut l'inventeur de l'électromètre à condensateur ultrasensible. Bien qu'étant un homme modeste, l'unité de la différence de potentiel électrique, ou « tension » comme Volta avait l'habitude de la désigner, fut déduite de son propre nom**. Une « batterie » est constituée d'un grand nombre de cellules voltaïques : ce terme pro-

* Une *cellule secondaire* est une cellule rechargeable.

** En anglais, la tension électrique se dit « voltage ». [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vient d'un usage plus récent et pratiquement exclusivement militaire*. Une batterie de téléphone portable constitue tout simplement un agencement plus élaboré d'un certain nombre de pommes ou de pommes de terre.

* *

Un PC ou un téléphone peut communiquer sans câble, en utilisant des ondes radio. Pourquoi ceux-ci, ainsi que les autres appareils électriques, ne sont-ils pas capables d'obtenir
Défi 40 s leur *alimentation électrique* via les ondes radio, éliminant ainsi les câbles électriques ?

* *

Les objets qui ne possèdent pas de symétrie droite–gauche sont qualifiés de *chiraux*, d'après le mot grec signifiant « main ». Pouvez-vous réaliser un miroir qui ne permute
Défi 41 s pas la chiralité (c'est-à-dire qui « ne permute pas la droite et la gauche ») ? De deux manières différentes ?

* *

Un rouleau de ruban adhésif est un dispositif redoutable. Si vous tirez vivement le rouleau, vous pouvez provoquer une émission de lumière (par le biais de la triboluminescence) et de petites étincelles. On soupçonne que plusieurs explosions dans des mines furent déclenchées parce qu'une telle étincelle a enflammé un mélange de gaz combustible.

* *

Prenez une enveloppe, mouillez-la et cachetez-la. Après l'avoir laissée sécher pendant une journée ou plus, ouvrez-la dans l'obscurité. À l'emplacement où les deux côtés du papier sont en train d'être séparés l'un de l'autre, l'enveloppe émet une lueur bleutée.
Défi 42 s Pourquoi ? Est-il possible d'accélérer cette expérience en utilisant un sèche-cheveux ?

* *

L'électromagnétisme est plein d'effets étonnants et arbore de nombreuses réalisations qui peuvent être reproduites à la maison. Internet regorge de descriptions permettant de construire des bobines Tesla pour engendrer des étincelles, des canons magnétiques ou des canons électriques pour projeter des objets, des machines électrostatiques pour faire hérisser vos cheveux, des bocaux en verre avec décharges tactiles et beaucoup d'autres encore. Si vous aimez expérimenter, effectuez simplement une recherche sur ces termes.

* *

Une haute tension peut engendrer une circulation de courant à travers l'air, parce que l'air devient conducteur dans des champs électriques puissants. Lors de telles décharges, les molécules de l'air sont mises en mouvement. Par conséquent, nous pouvons faire en sorte que des objets, qui sont fixés à une source pulsée de haute tension, s'élèvent en l'air si nous optimisons ce mouvement de l'air de telle façon qu'il soit dirigé partout

* Une pile faite de successions de plaques de zinc, de feuilles de papier buvard imbibées d'eau salée et de pièces en cuivre est aisée à construire chez soi et à tester avec une calculatrice ou une montre à affichage
Défi 39 e numérique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

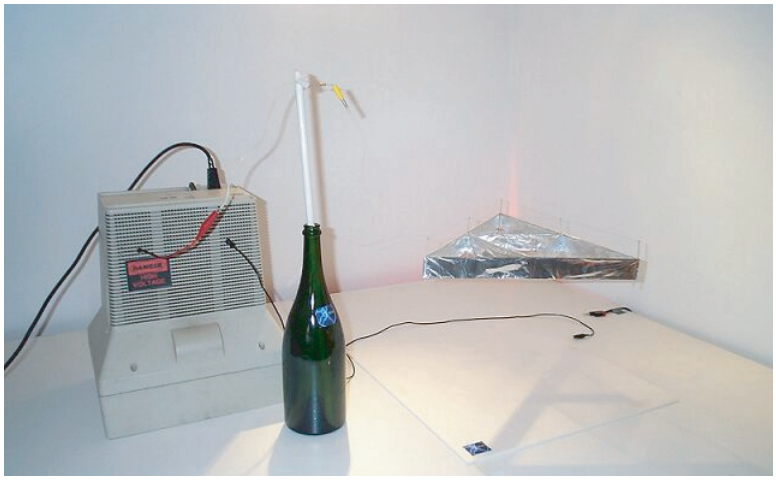


FIGURE 18
Soulèvement d'un objet léger – recouvert d'une feuille d'aluminium – en utilisant une décharge de haute tension. (© Jean-Louis Naudin sur www.jlnlabs.org)

vers le bas. Cette haute tension est donc effectivement utilisée pour accélérer l'air ionisé dans une direction. Par conséquent, un objet se déplacera dans la direction opposée, en employant le même principe qu'une fusée. Un exemple, qui utilise l'alimentation électrique d'un écran d'ordinateur, est indiqué sur la Figure 18. (Soyez prudents : danger !) Une foule de sites Web expliquent comment construire ces ascenseurs chez soi. Sur la Figure 18, la bouteille et la bougie sont utilisées comme isolants de haute tension pour maintenir l'un des deux minces fils de haute tension (non visible sur la photographie) suffisamment haut en l'air, afin d'éviter que les décharges ne se produisent dans l'environnement ou n'interfèrent avec le mouvement de l'ascenseur. Malheureusement, la plupart des sites Web – pas tous – fournissent des explications erronées ou confuses de ce phénomène. Ces sites Web représentent donc un excellent exercice afin que nous apprenions à discerner la réalité de la spéculation.

Défi 43 e

* *

Les effets électriques produits par le frottement et par l'écoulement liquide sont généralement insignifiants. Cependant, dans les années 1990, un nombre important de pétroliers sombrèrent subitement. Les marins avaient lavé les réservoirs de pétrole en arrosant les parois des cuves avec de l'eau de mer. L'arrosage conduisit au chargement en électricité des réservoirs, une décharge provoqua alors l'inflammation des vapeurs de pétrole contenues dans les cuves. Cela déclencha une explosion, suite à quoi les pétroliers coulèrent. Des accidents analogues se produisent aussi régulièrement lorsque des produits chimiques sont transvasés d'une citerne à une autre.

* *

En frottant une cuillère en plastique avec un morceau de laine, celle-ci se charge. Une telle cuillère chargée peut être utilisée pour extraire du poivre d'un mélange sel–poivre en tenant la cuillère au-dessus du mélange. Pourquoi ?

Défi 44 s

* *

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

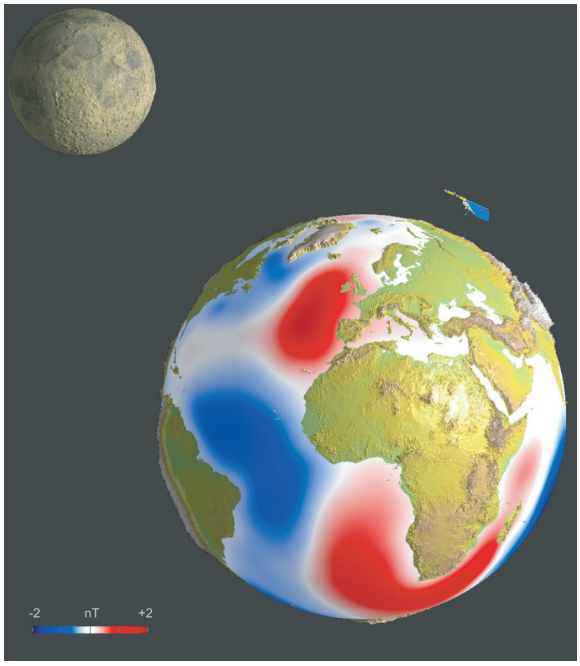


FIGURE 19 Le champ magnétique dû aux marées. (© Stefan Maus)

Lorsque des charges se déplacent, elles engendrent un champ magnétique. En particulier, lorsque des ions situés à l'intérieur de la Terre se déplacent à cause des mouvements de convection, ils donnent naissance au champ magnétique terrestre. Quand les ions situés très haut dans l'atmosphère sont déplacés par l'action du vent solaire, un orage géomagnétique surgit. L'intensité de son champ peut être aussi importante que celle de la Terre elle-même. En 2003, un mécanisme supplémentaire fut découvert. Lorsque les marées déforment la surface de l'eau des océans, les ions contenus dans l'eau de mer produisent un minuscule champ magnétique, qui peut être mesuré par des magnétomètres ultrasensibles embarqués dans les satellites gravitant autour de la Terre. Après deux années de mesures effectuées par un petit satellite, il a été possible de réaliser un magnifique film des flux océaniques. La Figure 19 en donne un exemple.

Réf. 24

* *

Les termes électrode, électrolyte, ion, anode et cathode ont été suggérés par William Whewell (1794–1866) à la demande de Michael Faraday. Ce dernier n'ayant pas d'éducation formelle, il avait demandé à son ami Whewell de forger deux mots d'origine grecque pour lui. Pour anode et cathode, Whewell considéra des mots qui signifient littéralement « rue ascendante » et « rue descendante ». Faraday vulgarisa alors ces termes, comme les autres mots mentionnés ci-dessus.

* *

L'impulsion lumineuse la plus courte produite jusqu'à présent a une longueur de 100 as. À combien de longueurs d'onde de lumière verte celle-ci correspond-elle ?

Défi 45 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

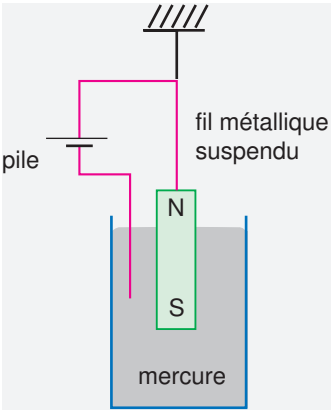


FIGURE 20 Un moteur unipolaire.

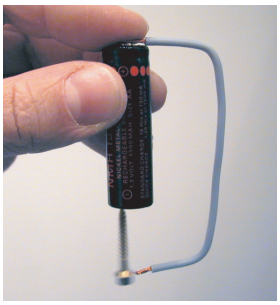


FIGURE 21 Le moteur le plus simple. (© Stefan Kluge)

* *

Pourquoi voyons-nous souvent les ombres des maisons et les ombres des arbres, mais
Défi 46 s jamais les ombres des câbles électriques suspendus au-dessus des rues ?

* *

Comment mesureriez-vous la vitesse de la pointe d'un coup de foudre ? Quelle plage de
Défi 47 s valeurs attendriez-vous ?

* *

Réf. 25 Un des moteurs électriques les plus simples possibles fut découvert par Faraday en 1831. Un aimant suspendu dans du mercure va commencer à tourner sur lui-même si un courant circule à travers lui. (Regardez la Figure 20.) De surcroît, lorsque nous obligeons l'aimant à tourner, le dispositif (également souvent dénommé roue de Barlow) fonctionne aussi comme un générateur de courant. D'aucuns ont même tenté de produire du cou-
Défi 48 s rant domestique avec un tel système ! Pouvez-vous préciser son fonctionnement ?

La version moderne de ce moteur fonctionne avec une pile, un fil métallique, un aimant conducteur au samarium–cobalt et une vis. Le résultat est indiqué sur la Figure 21.

* *

Réf. 26 Le champ magnétique de la Terre possède une intensité dipolaire de $7{,}8 \cdot 10^{22}\,\mathrm{A\,m^2}$. Il nous protège, comme l'atmosphère, des particules issues du rayonnement cosmique et du vent solaire fatals, en les déviant vers les pôles. Aujourd'hui, une absence de champ magnétique entraînerait une forte exposition aux rayonnements lors des journées ensoleillées mais, par le passé, son absence aurait empêché l'évolution des espèces humaines. Nous devons notre existence au champ magnétique.

* *

L'ionosphère qui entoure la Terre possède une fréquence de résonance de 7 Hz. Pour cette raison, tout appareil mesurant des basses fréquences détecte toujours un signal fort

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

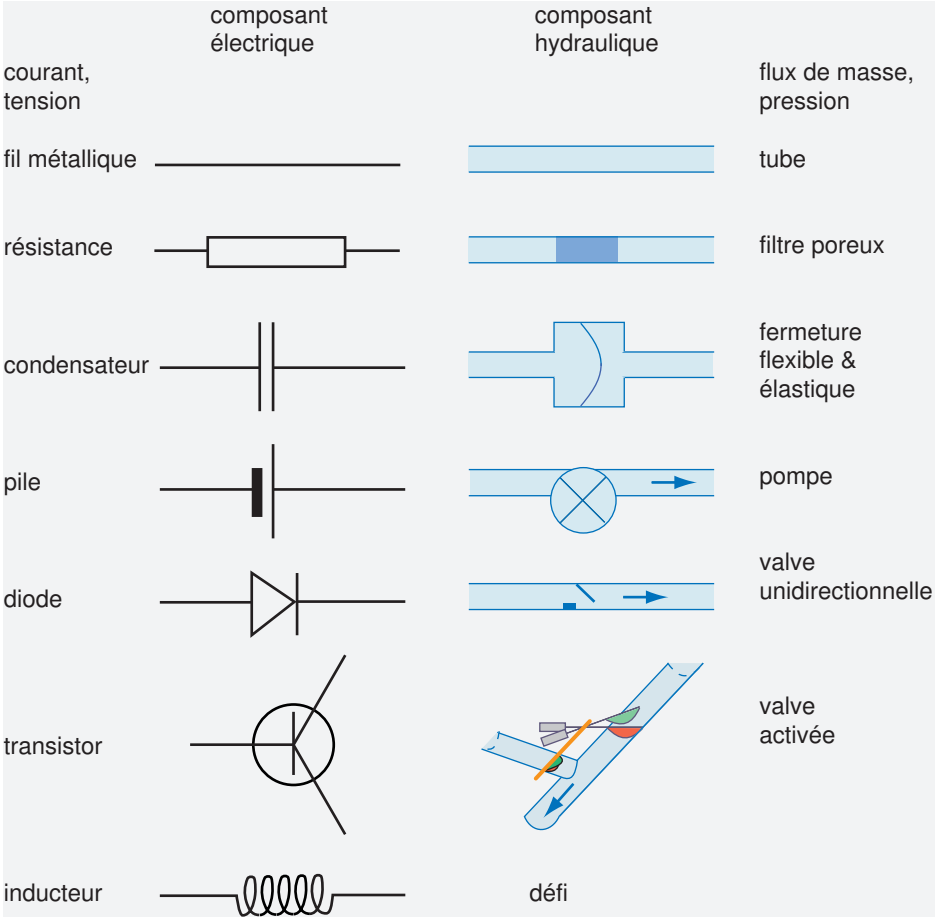


FIGURE 22 La correspondance entre l'électronique et l'écoulement de l'eau.

Défi 49 s à cette valeur. Pouvez-vous fournir une explication de cette fréquence ?

* *

Le Soleil est visible à l'œil nu jusqu'à une distance de 50 années-lumière seulement. Est-
Défi 50 s ce vrai ?

* *

À la maison, l'électricité est principalement utilisée sous la forme de courant alternatif. Autrement dit, aucun électron ne circule vraiment à travers les fils, puisque la vitesse de
Page 124 dérive des électrons dans les fils de cuivre est de l'ordre de 1 µm/s ; ceux-ci se déplacent simplement d'avant en arrière de 20 nm. Rien ne rentre ni ne sort des câbles ! Pourquoi les entreprises de production d'électricité exigent-elles un véritable flux d'argent en com-
Défi 51 e pensation, au lieu de se satisfaire d'un aller et retour monétaire ?

* *

La comparaison entre l'électricité et l'eau constitue une bonne manière de comprendre

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

l'électronique. La Figure 22 montre quelques exemples que même un adolescent peut manipuler. Pouvez-vous compléter cette correspondance pour la bobine, donc pour un transformateur ? Défi 52 s

* *

Les électrons et les protons ont-ils la même charge ? Des expériences montrent que les valeurs sont équivalentes à au moins vingt chiffres près. Comment pourriez-vous le vérifier ? Défi 53 pe

* *

Défi 54 pe La charge est également indépendante de la vitesse. Comment pourriez-vous le vérifier ?

* *

Les aimants peuvent être utilisés, même par des écoliers, pour grimper le long de parois métalliques. Jetez un œil au site Web www.physicslessons.com/TPNN.htm.

* *

Des champs magnétiques extrêmement puissants révèlent des effets étranges. Pour des champs de 10^{10} T, le vide devient significativement biréfringent, des photons peuvent se séparer et fusionner, et les atomes sont comprimés. On estime que les atomes d'hydrogène, par exemple, sont deux cents fois plus proches les uns des autres dans une direction donnée. Par chance, ces conditions extrêmes n'existent que dans des étoiles à neutrons particulières, appelées *magnétars*. Page 76

* *

Une bonne façon de faire des affaires consiste à produire de l'électricité et à la vendre. En 1964, une méthode complètement inédite fut inventée par Fletcher Osterle. Cette méthode fut présentée à un large public lors d'une admirable expérience en 2003. Nous pouvons prendre une plaque de verre, y ajouter des couches conductrices de chaque côté, puis graver quelque cent mille canaux minuscules à travers la plaque, chacun d'un diamètre d'environ 15 µm. Lorsque de l'eau s'écoule à travers ces canalisations, un courant est produit. Les contacts au niveau des deux plaques conductrices peuvent être utilisés comme bornes de batterie. Réf. 27

Ce dispositif élémentaire tire profit du fait que le verre, comme la plupart des isolants, est recouvert d'une couche chargée lorsqu'il est plongé dans un liquide. Pouvez-vous imaginer pourquoi un courant est généré ? Malheureusement, le rendement de cette production électrique n'est que de 1 % environ, rendant cette méthode beaucoup moins intéressante qu'une simple roue à auges actionnant une dynamo. Défi 55 s

* *

Pour visualiser de magnifiques animations sur les champs magnétique et électrique, consultez le site web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations.

* *

Les semi-conducteurs à arséniure de gallium peuvent être modelés sous la forme de nanocristaux (ou particules quantiques) et de contacts ponctuels quantiques. Ces structures

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

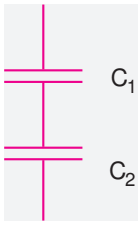


FIGURE 23 Condensateurs en série.

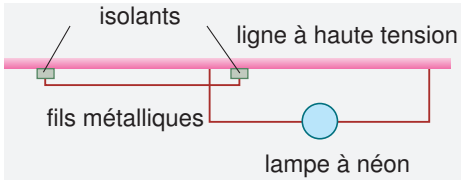


FIGURE 24 Une lampe à néon suspendue sous une ligne à haute tension.

permettent de compter les électrons un à un, ce qui est désormais réalisé de manière routinière dans plusieurs laboratoires dans le monde.

* *

La loi d'Ohm, l'observation selon laquelle pour la majorité des matériaux l'intensité du courant est proportionnelle à la tension, est due à un professeur. Georg Simon Ohm* explora très profondément cette question. Si à l'époque de telles mesures étaient difficiles à réaliser, cela a changé maintenant. Récemment, la résistance électrique d'atomes uniques a même été mesurée : dans le cas du xénon, elle se révèle être d'environ $10^5\ \Omega$. Il est également apparu que des atomes de plomb sont dix fois plus conducteurs que des atomes d'or. Pouvez-vous imaginer pourquoi ?

Réf. 87

Défi 56 pe

* *

Les charges contenues dans deux condensateurs montés en série ne sont généralement pas égales, comme le laisserait entendre une théorie naïve. Idéalement, pour des condensateurs parfaits, sans pertes, le rapport des tensions est donné par le rapport inverse des capacités $V_1/V_2 = C_2/C_1$, à cause de l'égalité entre les charges électriques emmagasinées. On déduit facilement cela de la Figure 23. Cependant, en pratique, ce n'est correct que pour des durées allant de quelques minutes à quelques douzaines de minutes. Pourquoi ?

Réf. 88

Défi 57 s

* *

Sur certaines lignes principales à haute tension qui traversent le paysage, des petites lampes à néon brillent lorsque le courant circule, comme indiqué sur la Figure 24. (Vous pouvez les voir depuis le train lorsque vous voyagez de Paris à l'aéroport de Roissy.) Comment cela est-il possible ?

Défi 58 pe

* *

La *polarisabilité électrique* est la propriété de la matière responsable de la déviation de l'écoulement de l'eau d'un robinet, provoquée par un peigne chargé. Elle est définie comme étant l'intensité du dipôle électrique induit par un champ électrique appliqué.

Page 15

* Georg Simon Ohm (n. Erlangen 1789, d. Munich 1854) était un physicien et professeur bavarois. Ses efforts furent reconnus tard seulement dans sa vie, et il devint en fin de compte professeur à l'université de Munich. Par la suite, l'unité de la *résistance électrique*, le facteur de proportionnalité entre la tension et l'intensité, fut nommée en son honneur.

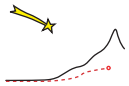
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La définition traduit simplement le fait que de nombreux objets acquièrent une charge lorsqu'un champ électrique leur est appliqué. À ce propos, la manière précise dont les peignes se chargent lorsqu'ils sont frottés, un phénomène appelé *électrification*, constitue toujours une des énigmes de la science moderne.

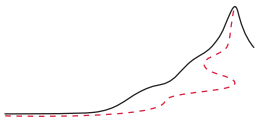
* *

Un champ magnétique pur ne peut pas être transformé en un champ électrique pur par un changement de référentiel d'observation. Le mieux que nous puissions obtenir est un état similaire à un mélange équilibré de champs magnétique et électrique. Pouvez-vous fournir un argument qui éclaircit ce phénomène ?

Défi 59 pe



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 2

DESCRIPTION DE LA DYNAMIQUE DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Entre les années 1861 et 1865, considérant en détail toutes les expériences qui lui étaient connues, James Clerk Maxwell produisit une description de l'électromagnétisme qui forme l'un des piliers de la physique*. Maxwell prit en considération tous les résultats expérimentaux et extirpa leurs principes fondamentaux communs, comme indiqué sur les Figures 25 et 26. Vingt ans plus tard, Heaviside et Hertz extrayaient les points essentiels des idées de Maxwell, baptisant leur synthèse la *théorie de Maxwell du champ électromagnétique*. Elle est composée de deux équations (quatre dans le cas non relativiste).

Page ??

La première équation représente la formulation précise qui stipule que les champs électromagnétiques *naissent des charges*, et de nulle part ailleurs. L'équation correspondante s'écrit sous différentes formes**

$$
\begin{aligned}
&d\boldsymbol{F} = j\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad \text{ou} \\
&d^{\nu}\boldsymbol{F}_{\mu\nu} = j^{\mu}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad \text{ou} \\
&(\partial_t/c, -\partial_x, -\partial_y, -\partial_z)\begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\,(\rho, j_x/c, j_y/c, j_z/c) \text{ ou} \\
&\nabla\boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{et} \quad \nabla \wedge \boldsymbol{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \mu_0 \boldsymbol{j}\,.
\end{aligned}
\tag{16}
$$

Chacune des quatre manières équivalentes d'écrire cette équation fait une constatation élémentaire : *la charge électrique porte le champ électromagnétique*. Cette remarque, et

* James Clerk Maxwell (n. Édimbourg 1831, d. Cambridge 1879) était un physicien écossais. Il fonda l'électromagnétisme en unifiant de manière théorique l'électricité et le magnétisme, comme il est décrit dans ce chapitre. Son œuvre sur la thermodynamique forme le second pilier de ses activités. De plus, il étudia la théorie des couleurs et développa le triangle des couleurs (également appelé « triangle de Maxwell » [N.d.T.]). Il fut l'un des premiers à réaliser des photographies en couleurs. Il est considéré par beaucoup comme le plus grand physicien ayant existé. « Clerk » et « Maxwell » forment tous les deux ses noms de famille.

** Maxwell généralisa cette équation aux situations où les charges ne sont pas entourées par du vide, mais situées à l'intérieur de la matière. Nous n'explorerons pas ces cas durant notre promenade parce que, comme nous le verrons au cours de notre ascension montagneuse, le cas apparemment particulier du vide décrit en réalité toute la nature.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

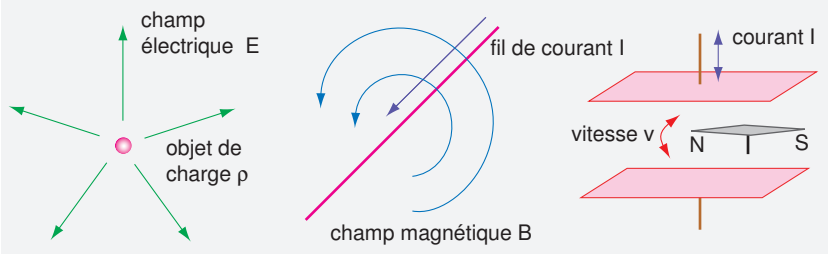


FIGURE 25 La première équation de Maxwell.

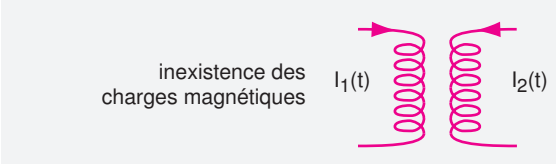


FIGURE 26 La deuxième équation de Maxwell.

également ses équations, est équivalente aux trois observations fondamentales de la Figure 25. Elle décrit la relation de Coulomb, la relation d'Ampère, et la manière dont la variation des champs électriques induit les effets magnétiques, comme vous devriez pouvoir le vérifier vous-même.

Défi 60 pe

La deuxième moitié de la dernière forme de l'équation (16) fait appel à la règle de la main droite pour les champs magnétiques situés autour des fils, à travers le produit vectoriel. L'équation établit également que la variation des champs électriques induit des champs magnétiques. Cet effet est crucial dans l'enroulement primaire des transformateurs. Le facteur $1/c^2$ implique que cet effet est petit ; c'est pourquoi des bobines ayant un grand nombre d'enroulements ou des courants électriques puissants sont nécessaires pour le déceler. À cause du produit vectoriel, toutes les lignes du champ magnétique induit sont des lignes fermées.

Défi 61 e

Le deuxième fruit du travail de Maxwell concerne la description détaillée de la manière dont les champs électriques oscillants créent des champs magnétiques, et vice versa. En particulier, un champ électrique peut exhiber des tourbillons uniquement lorsqu'il y a un champ magnétique variable. De surcroît, elle exprime le fait observable que dans la nature il n'existe pas de charges magnétiques, c'est-à-dire que les champs magnétiques n'ont pas de source. Tous ces résultats sont décrits par la relation suivante que l'on trouve

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sous différentes formes

$$
\begin{aligned}
& d\,{}^*\boldsymbol{F} = 0 \quad \text{avec} \quad {}^*\boldsymbol{F}^{\rho\sigma} = \frac{1}{2}\varepsilon^{\rho\sigma\mu\nu}\boldsymbol{F}_{\mu\nu} \quad \text{ou} \\
& \varepsilon_{\mu\nu\rho}\partial_\mu \boldsymbol{F}_{\nu\rho} = \partial_\mu \boldsymbol{F}_{\nu\rho} + \partial_\nu \boldsymbol{F}_{\rho\mu} + \partial_\rho \boldsymbol{F}_{\mu\nu} = 0 \quad \text{ou} \\
& \begin{pmatrix} \gamma\frac{1}{c}\partial_t \\ \gamma\partial_x \\ \gamma\partial_y \\ \gamma\partial_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & B_x & B_y & B_z \\ -B_x & 0 & -E_z/c & E_y/c \\ -B_y & E_z/c & 0 & -E_x/c \\ -B_z & -E_y/c & E_x/c & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{ou} \qquad (17) \\
& \nabla \boldsymbol{B} = 0 \quad \text{et} \quad \nabla \wedge \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\,.
\end{aligned}
$$

Cette relation exprime l'*absence de sources pour le tenseur dual du champ*, généralement noté ${}^*\boldsymbol{F}$: il n'y a pas de charges magnétiques, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de monopôles magnétiques dans la nature. En pratique, cette équation est toujours employée en association avec la précédente. Pouvez-vous voir pourquoi ?

Défi 62 pe

Puisqu'il n'y a pas de charges magnétiques, les lignes du champ magnétique sont toujours fermées, elles ne possèdent aucun point de départ ou d'arrivée. Par exemple, les lignes du champ se prolongent à l'intérieur des aimants. On exprime souvent cela sous forme mathématique en stipulant que le *flux magnétique* traversant une surface fermée S – telle qu'une sphère ou un cube – *s'annule toujours* : $\int_S \boldsymbol{B}\mathbf{d}A = 0$.

La seconde moitié de la dernière forme de l'équation (17), également indiquée sur la Figure 26, exprime l'idée que les variations dans les champs magnétiques produisent des champs électriques : cet effet est utilisé dans les enroulements secondaires des transformateurs et dans les dynamos. Le produit vectoriel présent dans cette expression implique qu'un champ électrique engendré de cette manière – également appelé *champ électromoteur* – ne possède aucune extrémité de départ ou d'arrivée. Les lignes du champ électromoteur dessinent donc des cercles : dans la majorité des situations concrètes, elles circulent le long des circuits électriques. Le signe moins est primordial pour assurer la conservation de l'énergie et possède une dénomination spécifique : c'est la *règle de Lenz*.

De même que l'équation d'évolution de Lorentz (11), qui décrit comment les charges se déplacent si nous connaissons le mouvement des champs, les équations d'évolution de Maxwell (16) et (17) décrivent *tous* les phénomènes électromagnétiques se produisant aux échelles de la vie courante, des téléphones portables et des batteries de voiture aux ordinateurs personnels, aux lasers, à l'éclair, aux hologrammes et aux arcs-en-ciel. Nous détenons dorénavant un système aussi structuré que l'expression $a = GM/r$ ou que les équations du champ d'Einstein pour la gravitation.

Nous n'étudierons pas les nombreuses applications des équations du champ, mais nous allons immédiatement poursuivre notre objectif qui est de comprendre le lien avec le mouvement quotidien et avec le mouvement de la lumière. En réalité, le champ électromagnétique possède une propriété importante que nous avons citée tout au départ : le champ lui-même peut se déplacer.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

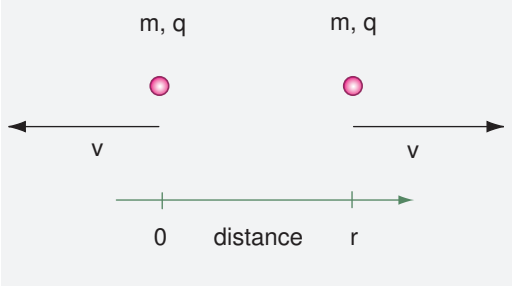


FIGURE 27 Particules chargées après une collision.

Collisions de particules chargées

Une expérience simple permet de clarifier les propriétés des champs électromagnétiques définies ci-dessus. Lorsque deux particules chargées se heurtent, leur quantité de mouvement totale *n'est pas* conservée.

Imaginez deux particules de masse identique et de charge égale juste après une collision, quand elles sont en train de s'éloigner l'une de l'autre. Imaginez également que les deux masses sont grandes, de telle sorte que l'accélération due à leur répulsion électrique soit petite. Pour un observateur situé en leur centre de gravité commun, chaque particule ressent une accélération provenant du champ électrique de l'autre particule. Le champ électrique E est donné par ce que nous appelons la *formule de Heaviside*

Défi 63 pe

$$E = \frac{q(1 - v^2/c^2)}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \,. \tag{18}$$

En d'autres termes, le système possède globalement une quantité de mouvement totale nulle.

Considérez un deuxième observateur, se déplaçant par rapport au premier avec une vitesse v, de telle sorte que la première charge sera au repos. L'expression (18) conduit à deux valeurs *différentes* des champs électriques, une à l'emplacement de chaque particule. Autrement dit, le système des deux particules n'est pas en mouvement inertiel, comme nous pourrions nous y attendre. La quantité de mouvement totale n'est pas conservée. Où s'est-elle enfuie ?

Réf. 28

Défi 64 s

Cet effet, au premier abord surprenant, a été érigé au rang de théorème par Van Dam et Wigner. Ils montrèrent que, pour un système de particules interagissant à distance, l'énergie–impulsion totale des particules ne peut pas demeurer constante dans un référentiel inertiel quelconque.

Réf. 29

La quantité de mouvement totale du système est conservée uniquement parce que le champ électromagnétique lui-même transporte aussi de l'impulsion. Si les champs électromagnétiques possèdent une quantité de mouvement, alors ils sont capables de *frapper* des objets et d'être frappés par ceux-ci. Comme nous allons le montrer ci-dessous, la lumière est également un champ électromagnétique. Ainsi, nous devrions être capables de déplacer des objets en les éclairant avec de la lumière. Nous devrions même être capables de suspendre des particules en l'air en leur envoyant de la lumière par-dessous. Ces deux prédictions s'avèrent exactes, et certaines expériences vont bientôt être présentées.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nous concluons que n'importe quelle sorte de champ conduisant à des interactions entre particules doit transporter de l'énergie et de la quantité de mouvement, puisque cet argument s'applique à tous les cas de cette espèce. En particulier, il s'applique aux interactions nucléaires. En réalité, dans la partie quantique de notre ascension montagneuse nous découvrirons même un résultat complémentaire : tous les champs sont eux-mêmes constitués de particules. L'énergie et la quantité de mouvement des champs deviennent alors une manifestation évidente de leur présence.

Le champ de jauge – potentiel vecteur du champ électromagnétique

L'étude de la dynamique des champs est dénommée la *théorie des champs*, l'électrodynamique en représentant un exemple manifeste. (L'autre exemple classique est la dynamique des fluides : les champs électromagnétiques en mouvement et le mouvement des fluides sont mathématiquement très similaires.) La théorie des champs est un sujet d'étude magnifique ; les lignes du champ, les lignes équipotentielles et les lignes tourbillonnaires constituent certains des concepts qui sont introduits dans ce domaine. Ils fascinent de nombreuses personnes*. Cependant, dans cette ascension montagneuse, nous focaliserons la discussion sur le mouvement.

Nous avons vu que les champs nous obligent à étendre notre conception du mouvement. Le mouvement ne représente pas seulement la modification de l'état des objets et de l'espace-temps, mais également la *variation de l'état des champs*. Nous avons par conséquent besoin d'une description précise et exhaustive de l'état des champs. Les observations concernant l'ambre et les aimants nous ont montré que *les champs possèdent de l'énergie et de la quantité de mouvement*. Ils peuvent en transmettre aux particules. Les expériences avec les générateurs électriques ont indiqué que les objets peuvent accroître l'énergie et la quantité de mouvement des champs. Nous devons donc déterminer une *fonction d'état* qui nous permette de définir l'énergie et la quantité de mouvement pour les champs électrique et magnétique. Puisque ceux-ci transportent de l'énergie, leurs mouvements respectent la vitesse limite de la nature.

Maxwell avait déterminé la fonction d'état de manière classique, en deux étapes. La première est la définition du *potentiel vecteur du champ magnétique*, qui décrit la quantité de mouvement par unité de charge que le champ fournit : Réf. 30

$$\boldsymbol{A} = \frac{\boldsymbol{p}}{q} \,. \tag{19}$$

Lorsqu'une particule chargée se déplace à travers un potentiel magnétique $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})$, son impulsion varie de $q\Delta\boldsymbol{A}$: elle varie de la différence qu'il y a entre les valeurs de potentiel aux points de départ et d'arrivée, multipliée par sa charge. En raison de cette définition,

* Quelle est la relation, pour des champs statiques, entre les lignes du champ et les surfaces (équi)potentielles ? Une ligne de champ peut-elle traverser deux fois une surface de potentiel ? Pour plus de détails sur ces sujets, consultez le livre *gratuit* de Bo Thidé, *Electromagnetic Field Theory*, sur son site www.plasma.uu.se/CED/Book. Et, bien évidemment, lisez également les ouvrages, en langue anglaise, de Schwinger et de Jackson. Défi 65 s Réf. 1, Réf. 18

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

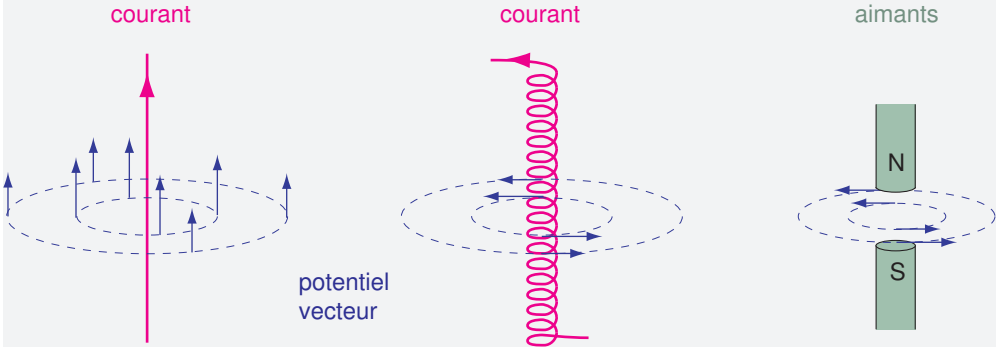


FIGURE 28 Potentiels vecteurs pour certaines situations sélectionnées.

le potentiel vecteur possède la propriété suivante

$$\mathrm{B} = \nabla \wedge \boldsymbol{A} = \mathrm{rot}\, \boldsymbol{A} \tag{20}$$

c'est-à-dire que le champ magnétique est le *rotationnel* du potentiel magnétique. En anglais, le rotationnel est noté « curl » mais, dans la plupart des langues, comme en français, il est noté « rot ». Pour visualiser ce que le rotationnel signifie, imaginez que les vecteurs du champ soient les vecteurs vitesse de l'écoulement de l'air. Maintenant, placez une minuscule éolienne en un point précis. Si elle tourne, le rotationnel n'est pas nul. La vitesse de rotation de l'éolienne est maximale dans une certaine direction de l'axe ; cette vitesse maximale définit à la fois la grandeur et la direction du rotationnel en ce point. (La règle de la main droite est implicitement requise.) Par exemple, le rotationnel des vecteurs vitesse d'un corps solide en rotation est partout de 2ω, soit le double de la vitesse angulaire.

Défi 66 pe

Réf. 31

Défi 67 pe

Le potentiel vecteur pour un long fil métallique droit transportant du courant est parallèle au fil, il possède la grandeur suivante

$$A(r) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \frac{r}{r_0}\,, \tag{21}$$

qui dépend de la distance radiale r au fil et d'une constante d'intégration r_0. Cette expression du potentiel vecteur, représenté sur la Figure 28, indique comment le courant qui se déplace engendre une quantité de mouvement linéaire dans le champ (électro)magnétique qui l'entoure. Dans le cas d'un solénoïde, le potentiel vecteur « circule » autour du solénoïde. La grandeur vérifie

$$A(\mathrm{r}) = -\frac{\Phi}{4\pi}\frac{1}{r}\,, \tag{22}$$

où Φ représente le flux magnétique situé à l'intérieur du solénoïde. Nous voyons qu'en général le potentiel vecteur est *entraîné dans le sillage* des charges en mouvement. Cet effet d'entraînement décroît pour des distances plus importantes. Cela s'accorde bien avec l'image du potentiel vecteur comme représentant la quantité de mouvement du

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

champ électromagnétique.

Ce comportement du potentiel vecteur autour des charges est évocateur de la manière dont le miel est entraîné dans le sillage d'une cuillère se déplaçant dans celui-ci. Dans les deux cas, cet effet d'entraînement décroît avec la distance. Toutefois, le potentiel vecteur, contrairement au miel, ne produit *aucun* frottement qui ralentit la charge en mouvement. Le potentiel vecteur se comporte donc comme un liquide sans frottement.

À l'intérieur du solénoïde, le champ magnétique est constant et uniforme. Pour un
Défi 68 e tel champ B nous trouvons un potentiel vecteur

$$\boldsymbol{A}(\mathrm{r}) = -\frac{1}{2}\boldsymbol{B} \wedge \boldsymbol{r} \,. \tag{23}$$

Dans ce cas, le potentiel magnétique s'accroît avec l'augmentation de la distance à l'origine*. Dans le centre du solénoïde, le potentiel s'annule. L'analogie avec le miel entraîné donne exactement le même comportement.

Cependant, il y a un piège. Le potentiel magnétique n'est *pas* défini de manière unique. Si $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})$ représente un potentiel vecteur, alors le potentiel vecteur distinct

$$\boldsymbol{A}'(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}) + \operatorname{grad}\Lambda \,, \tag{24}$$

où $\Lambda(t, \boldsymbol{x})$ représente une certaine fonction scalaire, est *également* un potentiel vecteur caractérisant la même situation. (Le champ magnétique B reste le même, cependant.) Pire, pouvez-vous confirmer que les valeurs (absolues) des quantités de mouvement cor-
Défi 69 pe respondantes varient aussi ? Cette inévitable ambiguïté, appelée *invariance de jauge* ou *symétrie de jauge*, constitue une propriété cruciale du champ électromagnétique. Nous l'explorerons plus en détail ci-après.

Non seulement la quantité de mouvement, mais également l'énergie du champ électromagnétique sont définies de manière équivoque. En réalité, la deuxième étape dans la spécification d'un état pour le champ électromagnétique est la définition du *potentiel*
Réf. 30 *électrique* comme étant l'énergie U par unité de charge :

$$\varphi = \frac{U}{q} \,. \tag{25}$$

Autrement dit, le potentiel $\varphi(\boldsymbol{x})$ en un point $\boldsymbol{x}$ est l'énergie nécessaire pour déplacer une charge unitaire jusqu'au point $\boldsymbol{x}$ à partir d'un point où le potentiel est nul. L'énergie potentielle est donc donnée par $q\varphi$. À partir de cette définition, le champ électrique $\boldsymbol{E}$ représente simplement la *variation* du potentiel avec la position, corrigée par la dépendance temporelle de la quantité de mouvement, c'est-à-dire

$$\boldsymbol{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{A} \,. \tag{26}$$

* C'est uniquement possible tant que le champ est constant ; puisque tous les champs s'atténuent aux grandes distances – parce que l'énergie d'un champ est toujours limitée –, le potentiel vecteur aussi chute aux grandes distances.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Manifestement, il existe une liberté dans le choix de la définition du potentiel. Si $\varphi(\boldsymbol{x})$ est un potentiel possible, alors

$$\varphi'(\boldsymbol{x}) = \varphi(\boldsymbol{x}) - \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{\Lambda} \tag{27}$$

représente également une fonction du potentiel pour la même situation. Cette liberté est la généralisation de la liberté pour définir l'énergie à une constante près. Néanmoins, le champ électrique $\boldsymbol{E}$ demeure le même pour tous les potentiels.

Réf. 30 Pour se convaincre que les potentiels représentent vraiment l'énergie et la quantité de mouvement du champ électromagnétique, nous remarquons que pour une charge en Défi 70 pe mouvement nous avons

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}mv^2 + q\varphi\right) &= \frac{\partial}{\partial t} q(\varphi - \boldsymbol{v}\boldsymbol{A}) \\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\boldsymbol{v} + q\boldsymbol{A}) &= -\nabla q(\varphi - \boldsymbol{v}\boldsymbol{A}) \,, \end{aligned} \tag{28}$$

ce qui indique que les variations de l'énergie et de la quantité de mouvement généralisées d'une particule (dans le membre de gauche) sont dues à la variation de l'énergie et de la quantité de mouvement du champ électromagnétique (dans le membre de droite*).

Dans la notation quadri-vectorielle relativiste, l'énergie et l'impulsion du champ apparaissent unifiées dans une seule quantité. La fonction d'état du champ électromagnétique devient

$$A^\mu = (\varphi/c, \boldsymbol{A}) \,. \tag{29}$$

Il est facile de voir que la description du champ est complète puisque nous avons

$$\boldsymbol{F} = d\,A \quad \text{ou} \quad \boldsymbol{F}^{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \,, \tag{30}$$

ce qui signifie que le champ électromagnétique F est complètement décrit par le quadrivecteur potentiel A. Mais, comme nous l'avons mentionné, le quadrivecteur potentiel lui-même *n'est pas* défini de manière unique. En réalité, n'importe quel autre quadrivecteur potentiel équivalent A' est relié à A par la *transformation de jauge*

$$A'^{\,\mu} = A^\mu + \partial^\mu \Lambda \tag{31}$$

où $\Lambda = \Lambda(t, x)$ représente n'importe quel champ scalaire arbitrairement choisi. Le nouveau champ A' conduit au *même* champ électromagnétique, et aux mêmes accélérations et évolutions. Le potentiel A constitue donc une *surdescription* de la situation physique puisque plusieurs choix de jauges *différents* correspondent à la *même* situation physique**. Par conséquent nous devons vérifier que tous les résultats des mesures sont

* Cette correspondance indique également pourquoi l'expression $P^\mu - qA^\mu$ apparaît si régulièrement dans les formules. En réalité, elle joue un rôle majeur dans la théorie quantique d'une particule située dans le champ électromagnétique.

** Nous désignons souvent le fait de choisir une fonction Λ par *choisir une jauge*. Le quadrivecteur potentiel

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

indépendants des transformations de jauge, c'est-à-dire que toutes les observables sont des quantités invariantes de jauges. De telles quantités invariantes de jauges sont, comme nous venons de le voir, les champs $\boldsymbol{F}$ et ${}^*\boldsymbol{F}$, et en général toutes les quantités classiques. Nous ajoutons que de nombreux physiciens théoriciens emploient le terme « champ électromagnétique » de manière imprécise à la fois pour désigner les quantités $F^{\mu\nu}$ et A_μ.

Il existe une image simple, due à Maxwell, pour aider à surmonter les difficultés conceptuelles introduites par le potentiel vecteur. Il apparaît que l'intégrale de A_μ sur une courbe fermée est invariante de jauge, parce que

Défi 71 e

$$\oint A_\mu \mathrm{d}x^\mu = \oint (A_\mu + \partial_\mu \Lambda)\mathrm{d}x^\mu = \oint A'_\mu \mathrm{d}x^\mu \,. \tag{32}$$

En d'autres termes, si nous nous représentons le potentiel vecteur comme étant une quantité qui nous permet d'associer un nombre à une minuscule boucle en chaque point de l'espace, nous obtenons une bonne image invariante de jauge du potentiel vecteur*.

Maintenant que nous avons défini une fonction d'état qui décrit l'énergie et la quantité de mouvement du champ électromagnétique, regardons ce qui se passe plus précisément quand des champs électromagnétiques se déplacent.

Énergie, quantité de mouvement et moment cinétique du champ électromagnétique

La description brossée jusqu'à présent nous permet de développer l'énergie *totale* E_{nergie} du champ électromagnétique comme

$$E_{\text{nergie}} = \frac{1}{8\pi} \int \varepsilon_0 \boldsymbol{E}^2 + \frac{\boldsymbol{B}^2}{\mu_0} \,\mathrm{d}V \,. \tag{33}$$

L'énergie apparaît donc au second degré dans les champs.

Pour la quantité de mouvement totale nous obtenons

$$\boldsymbol{P} = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \int \boldsymbol{E} \wedge \boldsymbol{B} \,\mathrm{d}V \,. \tag{34}$$

Cette expression est également appelée *vecteur de Poynting***.

Pour le moment cinétique total, nous avons

$$\boldsymbol{L} = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \int \boldsymbol{E} \wedge \boldsymbol{A} \,\mathrm{d}V \,, \tag{35}$$

où $\boldsymbol{A}$ représente le potentiel vecteur magnétique.

A est également appelé le *champ de jauge*. Cet usage curieux possède des raisons historiques et est maintenant commun à toute la physique.

Réf. 32 * Dans la partie de ce texte sur la théorie quantique, nous verrons que l'exposant de cette expression, à savoir $\exp(iq \oint A_\mu \mathrm{d}x^\mu)/\hbar$, généralement dénommé le *facteur de phase*, peut en réalité être observé directement dans les expériences.

** John Henry Poynting (1852–1914) introduisit ce concept en 1884.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Le lagrangien de l'électromagnétisme

Le mouvement des particules chargées et le mouvement du champ électromagnétique peuvent également être décrits en utilisant un lagrangien au lieu d'employer les trois équations données ci-dessus. Il n'est pas difficile de voir que l'action S_{EDC} pour une particule en électrodynamique classique peut être définie de manière symbolique par*

Défi 72 pe

$$S_{\text{EDC}} = -mc^2 \int \mathrm{d}\tau - \tfrac{1}{4\mu_0} \int \boldsymbol{F} \wedge *\boldsymbol{F} - \int j \wedge A \,, \tag{36}$$

ce qui, en notation indicielle, devient

$$S_{\text{EDC}} = -mc \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\eta_{\mu\nu} \frac{\mathrm{d}x_n^\mu(s)}{\mathrm{d}s} \frac{\mathrm{d}x_n^\nu(s)}{\mathrm{d}s}}\, \mathrm{d}s - \int_{\mathbf{M}} \left(\tfrac{1}{4\mu_0} \boldsymbol{F}_{\mu\nu} \boldsymbol{F}^{\mu\nu} + j_\mu A^\mu \right) \mathrm{d}^4 x \,, \tag{37}$$

ou, en notation 3-vectorielle

$$S_{\text{EDC}} = -mc^2 \int \mathrm{d}\tau - \int q\varphi + \int q v A + \int \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \,. \tag{38}$$

Ce qui est nouveau, c'est la mesure du changement (ou action) dû au champ électromagnétique. La variation pure du champ est donnée par le terme $\boldsymbol{F} \wedge *\boldsymbol{F}$, et le changement dû à l'interaction avec la matière est représenté par le terme $j \wedge A$.

Le principe de moindre action, comme d'habitude, établit que le changement qui intervient dans un système est toujours aussi petit que possible. L'action S_{EDC} conduit aux équations d'évolution à condition que cette action soit stationnaire sous des variations δ et δ' des positions et des champs qui tendent vers 0 à l'infini. Autrement dit, le principe de moindre action exige que

$$\begin{aligned} \delta S = 0 \quad & \text{quand} \quad x_\mu = x_\mu + \delta_\mu \quad \text{et} \quad A_\mu = A_\mu + \delta'_\mu \quad , \\ & \text{à condition que} \quad \delta x_\mu(\theta) \to 0 \quad \text{pour} \quad |\theta| \to \infty \\ & \text{et que} \quad \delta A_\mu(x_\nu) \to 0 \quad \text{pour} \quad |x_\nu| \to \infty \,. \end{aligned} \tag{39}$$

Page 179

De la même façon que dans le cas de la mécanique, en utilisant la méthode variationnelle pour les deux variables A et x, nous retrouvons les équations d'évolution pour la particule et les champs

Défi 73 pe

$$b^\mu = \frac{q}{m} \boldsymbol{F}^\mu_\nu \, u^\nu \quad , \quad \partial_\mu \boldsymbol{F}^{\mu\nu} = j^\nu \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad , \quad \text{et} \quad \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\nu \boldsymbol{F}_{\rho\sigma} = 0 \,, \tag{40}$$

que nous connaissons déjà. Évidemment, elles sont équivalentes au principe variationnel fondé sur S_{EDC}. Ces deux descriptions doivent être complétées en spécifiant les *condi-*

* Le produit décrit par le symbole $\wedge$, « coin » ou « chapeau », et l'opérateur dual $*$ possèdent une signification mathématique précise. Son contexte associé, le concept de *forme (mathématique)*, nous éloigne beaucoup trop de notre promenade. (En français, on utilise le même symbole $\wedge$ pour représenter le produit vectoriel. Voir par exemple les équations précédentes. [N.D.T.])

Réf. 33

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tions initiales pour les particules et les champs, ainsi que les *conditions limites* pour ces dernières. Nous avons besoin des dérivées d'ordre un et zéro de la position des particules, et de la dérivée d'ordre zéro pour le champ électromagnétique.

La forme du lagrangien implique que l'électromagnétisme soit *réversible dans le temps*, ce qui signifie que chaque exemple du mouvement engendré par des causes électriques ou magnétiques peut également se produire à l'envers. Nous le déduisons aisément des propriétés du lagrangien. D'un autre côté, la vie quotidienne exhibe de nombreux effets électriques et magnétiques qui ne sont pas temporellement invariants, comme lorsque des corps se brisent ou quand des ampoules électriques grillent. Pouvez-vous expliquer
Défi 74 s comment tous ces éléments s'ajustent dans ce modèle ?

En résumé, avec le lagrangien (36) toute l'électrodynamique classique peut être décrite et comprise. Dans le reste de ce chapitre, nous étudions certains sujets particuliers tirés de ce vaste domaine.

Symétries – le tenseur énergie–impulsion

Nous savons par la mécanique classique que nous retrouvons la définition du tenseur de l'énergie et de l'impulsion en tirant profit du théorème de Noether, si nous déterminons la quantité conservée à partir de la symétrie de Lorentz du lagrangien. Par exemple, nous remarquons que des particules relativistes possèdent un *vecteur* énergie–impulsion. Au point où la particule est située, il décrit l'énergie et la quantité de mouvement.

Puisque le champ électromagnétique n'est pas une entité localisée, comme une particule ponctuelle, mais une entité étendue, nous avons besoin de connaître le *flux* d'énergie et d'impulsion en chaque point de l'espace, *pour chaque direction* séparément. Tout cela fait qu'une description utilisant un *tenseur* est indispensable. Le résultat donne le *tenseur*
Page 180 *énergie–impulsion* du champ électromagnétique

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{T}^{\mu\nu} &= \left(\begin{array}{c|c} \text{densité d'énergie} & \text{flux d'énergie ou densité de moment} \\ \hline \text{flux d'énergie ou densité de moment} & \text{flux de moment} \end{array}\right) \\
&= \left(\begin{array}{c|c} u & \boldsymbol{S}/c = c\boldsymbol{p} \\ \hline c\boldsymbol{p} & T \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} 0 & \varepsilon_0 c \boldsymbol{E} \wedge \boldsymbol{B} \\ \hline \varepsilon_0 c \cdot & -\varepsilon_0 E_i E_j - B_i B_j/\mu_0 \\ \boldsymbol{E} \wedge \boldsymbol{B} & 1/2\delta_{ij}(\varepsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0) \end{array}\right)
\end{aligned}
\tag{41}
$$

Le tenseur énergie–impulsion montre à nouveau que l'électrodynamique est à la fois un invariant de Lorentz et de jauge.

Le lagrangien et le tenseur énergie–impulsion indiquent tous les deux que l'électrodynamique est symétrique sous des renversements du mouvement. Si toutes les charges modifient leurs directions de mouvement – une situation que nous dénommons souvent improprement le « renversement du temps » –, elles se déplacent alors à reculons en suivant exactement les trajectoires qu'elles ont empruntées lorsqu'elles se déplaçaient normalement.

Nous remarquons également que les charges et la masse violent une symétrie relative au vide que nous avons mentionnée en relativité restreinte : seul le vide est invariant sous des symétries conformes. En particulier, seul le vide est invariant sous la transformation

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 29 Lequel des deux est le paysage original ? (aimablement fourni par la NOAA)

spatiale $r \to 1/r$.

En bref, le mouvement électrodynamique, comme tous les autres exemples de mouvement que nous avons rencontrés jusqu'à présent, est déterministe, réversible et conservé. Cela ne constitue pas une énorme surprise. Néanmoins, deux symétries de l'électromagnétisme méritent une mention particulière.

Qu'est-ce qu'un miroir ?

Nous allons étudier les propriétés étranges des miroirs à plusieurs reprises au cours de notre excursion. Commençons avec la plus simple d'entre elles. Chacun peut observer, en marquant chacune de ses mains d'une couleur différente, qu'un miroir n'échange *pas* la droite et la gauche, pas plus qu'il n'échange le haut et le bas. Cependant, un miroir intervertit un *manchot* de la main droite en un de la main gauche et vice versa. En fait, il agit de la même manière lorsqu'il échange l'avant et l'arrière.

L'électrodynamique apporte une seconde réponse : un miroir est un dispositif qui commute les pôles magnétiques nord et sud. Pouvez-vous confirmer cela à l'aide d'un graphique ? Défi 75 s

Mais est-il toujours possible de discerner la gauche de la droite ? Cela semble enfantin : ce paragraphe est complètement différent d'une version ɘiɾɔɘ̀ʃtɘ̀ɪ, comme le sont la plupart des autres objets dans notre environnement. Mais considérez un paysage simple. Êtes-vous capable de désigner laquelle des deux images de la Figure 29 est l'original ?

De façon surprenante, il est effectivement impossible de distinguer une image originale de la nature de son image dans un miroir, si elle ne contient aucune trace humaine. Autrement dit, la nature de tous les jours est d'une certaine manière symétrique par rapport à la droite–gauche. Cette observation est si évidente que toutes les exceptions potentielles, du mouvement de la mâchoire d'une vache en train de ruminer à la croissance hélicoïdale des plantes, comme le houblon, ou à la direction de la forme en spirale des coquilles d'escargots, ont été considérablement étudiées*. Pouvez-vous en citer quelques Page ??

* La plus célèbre est la position du cœur. Les mécanismes conduisant à cette disposition sont toujours en cours d'investigation. Des recherches récentes suggèrent que le mouvement orienté des cils sur les embryons, probablement dans la région appelée le *nœud*, détermine l'asymétrie droite–gauche. Toutefois, l'origine profonde de cette asymétrie n'est pas encore élucidée. Réf. 34

Le corps humain présente majoritairement plus de muscles du côté droit chez les droitiers, tels Albert Einstein et Pablo Picasso, et du côté gauche chez les gauchers, tels Charlie Chaplin et Peter Ustinov. Cette

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 76 s autres ?

La symétrie droite–gauche de la nature émerge parce que la nature au quotidien est décrite par la gravitation et, comme nous le verrons, par l'électromagnétisme. Ces deux interactions partagent une propriété importante : le fait de substituer toutes les coordonnées dans leurs équations par les valeurs opposées correspondantes laisse les équations inchangées. Cela signifie que pour n'importe quelle solution de ces équations, c'est-à-dire pour n'importe quel système se produisant de manière naturelle, une image dans un miroir constitue une éventualité qui peut également se produire de manière naturelle. La nature de tous les jours ne peut donc pas faire une distinction entre la droite et la gauche. En réalité, il y a des droitiers *et* des gauchers, des gens ayant leur cœur à gauche *et* d'autres ayant leur cœur du côté droit, etc.

Pour explorer plus en avant cet aspect étrange de la nature, tentez l'expérience suivante : imaginez que vous êtes en train d'échanger des messages radio avec un Martien : êtes-vous capable de lui expliquer ce que sont la droite et la gauche, de telle façon que, lorsque vous vous rencontrez, vous êtes certains d'être en train de parler de la même
Défi 77 s chose ?

En fait, la symétrie miroir de la nature au quotidien – également appelée *invariance par parité* – est si répandue que la majorité des animaux ne peuvent pas distinguer la
Réf. 35 gauche de la droite de manière plus profonde. La plupart des animaux réagissent à des stimuli miroirs par des réactions miroirs. Il est difficile de leur enseigner les différentes manières de réagir, et cela n'est possible quasiment que pour les mammifères. Les nombreuses expériences réalisées dans ce domaine ont fait germer l'idée que les animaux possèdent des systèmes nerveux symétriques, et probablement seuls les hommes dénotent une *latéralisation*, c'est-à-dire une main privilégiée et des usages différents pour les parties droite et gauche du cerveau.

Pour résumer cette digression, l'électrodynamique classique respecte la symétrie droite–gauche, ou l'invariance par parité. Pouvez-vous le montrer en utilisant son la-
Défi 78 s grangien ?

Un miroir concave montre une image renversée, comme le fait un miroir plat s'il est partiellement plié dans le sens horizontal. Que se passe-t-il si l'on tourne ce miroir
Défi 79 s autour de la ligne de visée ?

Pourquoi les métaux sont-ils de bons miroirs ? Les métaux sont de grands absorbeurs de lumière. Tout absorbeur puissant possède un éclat métallique. Cela est vrai pour les métaux, s'ils sont suffisamment épais, mais aussi pour les cristaux de peinture ou d'encre. N'importe quel matériau qui absorbe fortement une longueur d'onde de lumière réfléchit également celle-ci efficacement. La raison de cette forte absorption du métal est due aux électrons situés à l'intérieur : ils peuvent se déplacer presque librement et donc absorber la plupart des fréquences de la lumière visible.

asymétrie reflète une asymétrie du cerveau humain, appelée latéralisation, laquelle est essentielle à la nature humaine.

Une autre asymétrie du corps humain est représentée par le bouclage des cheveux sur la nuque, la majorité des hommes n'en ont qu'un seul, et dans 80 % des cas il tourne vers la gauche. Mais de nombreuses personnes en ont plus d'un.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Quelle différence y a-t-il entre les champs électrique et magnétique ?

Bien sûr, la réponse courante consiste à dire que les champs électriques ont des sources, alors que les champs magnétiques n'en possèdent pas. De plus, les champs magnétiques sont des effets relativistes minuscules qui prédominent uniquement lorsque les vitesses des charges sont élevées ou lorsque les champs électriques s'annulent.

Pour des situations impliquant de la matière, cette distinction claire est correcte. Jusqu'à ce jour, aucune particule ayant une charge magnétique, appelée un *monopôle magnétique*, n'a été décelée, bien que son existence soit rendue possible dans plusieurs mo-
Page ?? dèles unifiés de la nature. Si elle est détectée, l'action (36) devrait être modifiée par l'adjonction d'un quatrième terme, à savoir la densité de courant magnétique. Cependant, aucune particule de ce type n'a encore été détectée, en dépit des efforts de recherche considérables.

Dans l'espace vide, lorsqu'il n'y a pas de matière au voisinage, il est possible d'avoir une conception radicalement différente. Dans l'espace vide, les champs électrique et magnétique peuvent être vus comme deux facettes de la même quantité, puisqu'une transformation telle que

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E} &\to c\,\boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} &\to -\boldsymbol{E}/c \end{aligned} \tag{42}$$

– nommée transformation par *dualité* (électromagnétique) – transforme chaque équation du vide de Maxwell en l'autre. Le signe moins est nécessaire pour cela. (En réalité, il
Défi 80 s existe d'autres transformations de ce type, pouvez-vous les indiquer ?) Par ailleurs, la transformation par dualité convertit $\boldsymbol{F}$ en ${}^*\boldsymbol{F}$. En d'autres termes, dans l'espace vide, nous *ne pouvons pas* distinguer les champs électriques des champs magnétiques.

La matière serait symétrique sous la dualité seulement si les charges magnétiques, également appelées monopôles magnétiques, existaient. Dans cette situation, la transformation (42) pourrait être étendue à

$$c\rho_{\mathrm{e}} \to \rho_{\mathrm{m}} \quad , \quad \rho_{\mathrm{m}} \to -c\rho_{\mathrm{e}} \,. \tag{43}$$

La révélation qui suit constitue l'une des grandes découvertes de la physique théorique : bien que l'électrodynamique classique incluant la matière ne soit pas symétrique sous la dualité, la nature l'est. En 1977, Claus Montonen et David Olive ont montré que la théorie quantique autorise les transformations par dualité même *avec* l'inclusion de la matière. Nous savions depuis les années 1930 que la théorie quantique autorise l'existence des monopôles magnétiques. Nous découvrirons les implications majeures de ce résultat dans la
Page ?? dernière partie de cet ouvrage. Cette dualité se révèle être l'un des progrès essentiels qui conduisent à une description unifiée du mouvement. (Voici une question annexe quelque peu ardue : en étendant cette dualité à la théorie quantique, pouvez-vous déduire quelle transformation est constatée pour la constante de structure fine, et pourquoi elle est si
Défi 81 d intéressante ?)

Par ailleurs, la dualité est une symétrie qui ne s'applique *que* dans l'espace-temps de Minkowski, c'est-à-dire dans les espaces-temps de 3+1 dimensions. Mathématiquement,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

la dualité est étroitement reliée à l'existence des quaternions, à la possibilité d'interpréter les poussées de Lorentz comme des rotations dans 3+1 dimensions, et finalement à la possibilité de définir d'autres structures mathématiques uniformes que la structure usuelle de l'espace R^4. Ces connexions mathématiques sont mystérieuses pour le moment ; elles soulignent d'une certaine manière le rôle particulier que les *quatre* dimensions d'espace-temps entretiennent dans la nature. Des détails supplémentaires deviendront évidents dans la dernière partie de notre ascension montagneuse.

L'ÉLECTRODYNAMIQUE AURAIT-ELLE PU ÊTRE DIFFÉRENTE ?

Toute interaction telle que la loi de Coulomb (3), qui agit, pour un observateur donné, entre deux particules indépendamment du vecteur vitesse, doit dépendre du vecteur vitesse pour d'autres observateurs inertiels*. Il apparaît qu'une telle interaction ne peut pas non plus être indépendante du quadrivecteur vitesse. Cette interaction, même si elle était vraiment dépendante du vecteur vitesse, modifierait la masse inertielle puisque le quadrivecteur accélération ne serait pas quadri-orthogonal au quadrivecteur vitesse.

Le cas suivant le plus simple est celui pour lequel l'accélération est proportionnelle au quadrivecteur vitesse. En association avec l'assignation que l'interaction laisse la masse au repos constante, nous retrouvons alors l'électrodynamique. Réf. 36

En fait, les nécessités de symétrie de jauge et de symétrie de relativité font également en sorte qu'il est impossible de modifier l'électrodynamique. En bref, il ne semble pas possible d'obtenir un comportement différent de la loi en $1/r^2$ pour une interaction classique.

Une dépendance en l'inverse du carré implique une masse évanescente pour la lumière et pour les particules de lumière, les photons. Cette masse est-elle réellement nulle ? Ce problème a été scrupuleusement étudié. Un photon massif conduirait à une dépendance en longueur d'onde de la vitesse de la lumière dans le vide, à des écarts par rapport à la « loi » de l'inverse du carré, à des déviations par rapport à la « loi » d'Ampère, à l'existence d'ondes électromagnétiques longitudinales et plus encore. Aucune évidence expérimentale concernant ces effets n'a été relevée. Une synthèse de ces études montre que la masse du photon est inférieure à 10^{-53} kg, ou peut-être 10^{-63} kg. Certains arguments n'étant pas unanimement acceptés, cette limite varie légèrement d'un chercheur à l'autre. Réf. 37

Une minuscule masse non nulle pour le photon modifierait imperceptiblement l'électrodynamique. L'introduction d'une petite masse ne pose aucun problème particulier : le lagrangien correspondant, que nous appelons *lagrangien de Proca*, a déjà été étudié, au cas où. Réf. 37

À strictement parler, nous ne pouvons pas dire que la masse du photon est nulle. En particulier, un photon ayant une longueur d'onde de Compton comparable au rayon de l'univers visible ne peut pas être discerné d'un autre ayant une masse nulle, par le truchement de n'importe quelle expérience. Cela donne une masse de 10^{-69} kg pour le photon. Nous remarquons que les limites expérimentales sont encore beaucoup plus grandes. Des photons ayant une telle valeur imperceptible de masse n'infirmeraient pas l'électrodynamique comme nous la connaissons.

* Nous pouvons déduire cela de la relativité restreinte à partir du raisonnement de la page 40 ou à partir de la formule en note de la page 71.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

De manière intéressante, une masse non nulle du photon implique l'inexistence de monopôles magnétiques, puisque la symétrie entre les champs électrique et magnétique est violée. Il est par conséquent primordial, d'une part, de tenter d'affiner la limite expérimentale de la masse et, d'autre part, d'explorer si la limite due à la taille de l'univers possède un quelconque rapport avec ce problème. Cette question est toujours ouverte.

Le défi le plus tenace de l'électrodynamique

L'électrodynamique fait face à un problème expérimental et théorique que les physiciens esquivent souvent. Le processus de la pensée est électrique dans la nature. La physique affronte deux défis dans ce domaine. Premièrement, les physiciens doivent découvrir des manières de modéliser le processus de la pensée. Deuxièmement, la technologie de la mesure doit être étendue afin de nous permettre de mesurer les courants qui circulent dans le cerveau.

Bien que d'importantes recherches aient été menées dans ces domaines, les chercheurs sont encore très loin d'une compréhension complète du phénomène. Des études utilisant la tomographie par ordinateur ont montré, par exemple, que la distinction entre le conscient et l'inconscient peut être mesurée et qu'elle possède des fondements biologiques. Des concepts psychologiques tels que le refoulement peuvent être observés dans de véritables radiographies du cerveau. Ceux qui élaborent les modèles des mécanismes du cerveau doivent donc apprendre à avoir le courage de considérer certains des concepts de la psychologie comme des descriptions de processus physiques concrets. Cette approche nous oblige à traduire la psychologie en modèles physiques, un procédé qui en est encore à ses balbutiements.

De manière analogue, la recherche sur les appareils de magnétoencéphalographie fait des progrès constants. Les champs magnétiques produits par les courants dans le cerveau sont aussi faibles que 10 fT, ce qui requiert des capteurs à la température de l'hélium liquide et une protection excellente contre le bruit ambiant. La résolution spatiale de ces systèmes doit également être améliorée.

Ce programme tout entier sera considéré comme achevé dès qu'il aura été possible, dans un avenir lointain, d'utiliser des dispositifs sensibles de mesure pour détecter ce qui se passe à l'intérieur du cerveau, et pour déduire ou « lire » les pensées d'un individu à partir de ces mesures. En réalité, ce défi pourrait être le plus complexe de tous ceux que la science a jamais affrontés. Sans aucun doute, cette expérience nécessitera une machinerie compliquée et coûteuse, de façon à ce qu'il n'y ait aucun danger dû à une mauvaise utilisation de cette technique. Il se pourrait aussi que la résolution spatiale nécessaire soit située au-delà des capacités de la technologie. Néanmoins, la compréhension et la modélisation du cerveau constitueront aussi une avancée utile pour d'autres aspects de la vie de tous les jours*.

Curiosités et défis amusants sur l'électrodynamique

Les animaux ne sont pas les seuls à pouvoir ressentir les champs électriques et magnétiques, les végétaux aussi. Au moins pour les champs magnétiques, les organes sensoriels

* Cette vision, formulée ici même en 2005, est si éloignée de toute réalisation qu'il n'est pas évident qu'elle puisse être vérifiée au cours du vingt et unième siècle ou dans un siècle ultérieur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

semblent utiliser des mécanismes très similaires à ceux utilisés par les animaux et les bactéries.

* *

Si vous évaluez le vecteur de Poynting pour un aimant chargé – ou plus simplement pour une charge ponctuelle située à proximité d'un aimant –, vous obtenez un résultat stupéfiant : l'énergie électromagnétique circule en boucle autour de l'aimant. Comment est-ce possible ? D'où ce moment cinétique provient-il ?

Défi 82 s

Pire, tout atome est un exemple d'un tel système – en fait, de deux systèmes de cette sorte. Pourquoi cet effet n'est-il pas pris en considération dans les calculs en théorie quantique ?

Réf. 86

* *

Des ondes électromagnétiques parfaitement sphériques sont impossibles dans la nature. Pouvez-vous le montrer en utilisant les équations de Maxwell de l'électromagnétisme, ou même sans elles ?

Défi 83 s

* *

Quel est le champ de Poynting le long d'un double fil métallique ? Autour d'un double fil avec résistance ?

Défi 84 pe

* *

Défi 85 pe Quel est le champ de Poynting dans un transformateur ?

* *

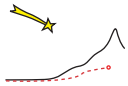
Il existe une ambiguïté célèbre dans la définition de l'énergie électromagnétique. Richard Feynman discute de celle-ci dans ses *Lectures on Physics*, à la section 27-4. Pouvez-vous découvrir une expérience où cette ambivalence joue un rôle ?

Défi 86 pe

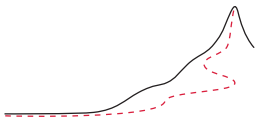
* *

N'importe quelle prise de courant murale est un dipôle alimenté par un champ électrique alternatif. Pourquoi une prise de courant, qui délivre 230 V ou 100 V à 50 Hz ou 60 Hz, n'émet-elle pas de champ électromagnétique ?

Défi 87 s



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 3

QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'essence de la lumière a fasciné les explorateurs de la nature au moins depuis
Réf. 38 l'époque de la Grèce antique. En 1865, Maxwell synthétisa toutes les données recueillies durant les 2 500 ans qui l'avaient précédé en déduisant une conséquence élémentaire des équations de l'électrodynamique. Il découvrit que, dans le cas de l'espace vide, les équations du champ électrodynamique peuvent être écrites ainsi

$$\Box \boldsymbol{A} = 0 \quad \text{ou, également} \quad \varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = 0 \,. \tag{44}$$

Défi 88 e Cela est appelé une *équation d'onde*, parce qu'elle admet des solutions du type

$$\boldsymbol{A}(t, \boldsymbol{x}) = \boldsymbol{A}_0 \sin(\omega t - \boldsymbol{k}x + \delta) = \boldsymbol{A}_0 \sin(2\pi f t - 2\pi \boldsymbol{x}/\lambda + \delta) \,, \tag{45}$$

qui sont communément appelées des *ondes planes*. Une telle onde satisfait l'équation (44) pour toute valeur d'*amplitude* A_0, de *phase* δ, et de *fréquence angulaire* ω, étant donné que le *vecteur d'onde* $\boldsymbol{k}$ vérifie la relation

$$\omega(\boldsymbol{k}) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} k \quad \text{ou} \quad \omega(\boldsymbol{k}) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \sqrt{\boldsymbol{k}^2} \,. \tag{46}$$

La relation $\omega(\boldsymbol{k})$ entre la fréquence angulaire et le vecteur d'onde, dite *relation de dispersion*, constitue la principale propriété de n'importe quelle sorte d'onde, qu'elle soit une onde sonore, une vague, une onde électromagnétique, ou toute autre espèce. La relation (46) caractérise plus particulièrement les ondes électromagnétiques dans le vide, et les distingue de tous les autres types d'ondes*.

L'équation (44) pour le champ électromagnétique est *linéaire* dans ce champ. Cela signifie que la somme de deux situations permises par celle-ci est elle-même une situation permise. Mathématiquement parlant, toute *superposition* de deux solutions est aussi une solution. Par exemple, cela indique que deux ondes peuvent se traverser sans se perturber mutuellement, et que des ondes peuvent voyager à travers des champs électromagnétiques statiques. La linéarité signifie également que toute onde électromagnétique peut être décrite comme une superposition d'ondes sinusoïdales pures, chacune d'entre elles

* Pour être exhaustif, nous rappelons qu'une *onde* en physique représente n'importe quelle perturbation en
Page 208 mouvement.

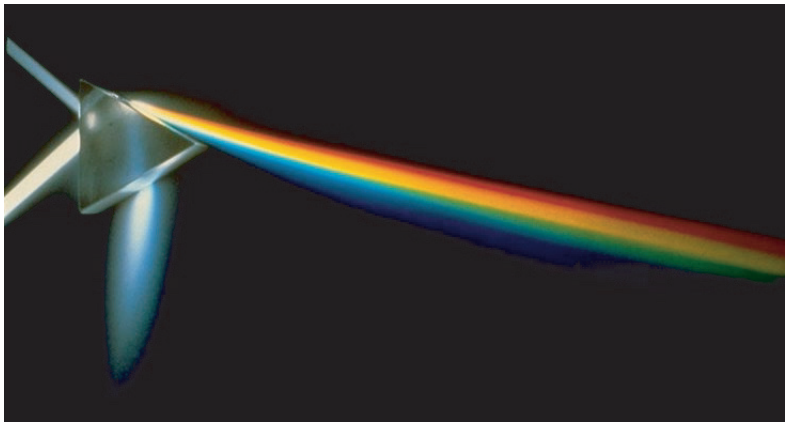


FIGURE 30 Lumière blanche traversant un prisme en verre. (photographie Susan Schwartzenberg, © Exploratorium www.exploratorium.edu)

FIGURE 31 Heinrich Hertz.

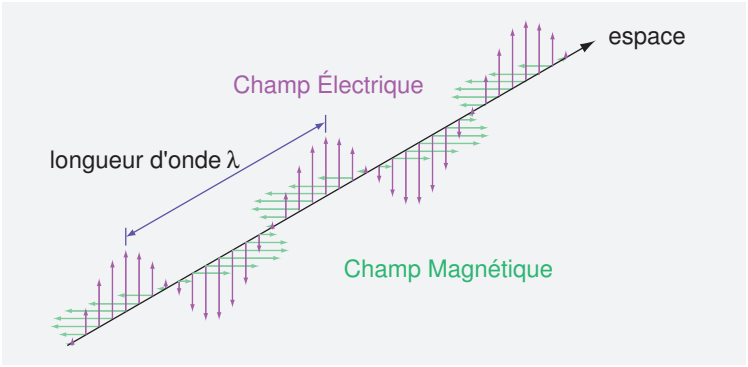


FIGURE 32 Structure générale d'une onde électromagnétique plane, monochromatique et linéairement polarisée, à un instant particulier.

étant décrite par l'expression (45). L'onde électromagnétique la plus simple possible, une
Page 75
onde harmonique plane ayant une polarisation linéaire, est illustrée sur la Figure 32. Remarquez que, pour ces ondes de type élémentaire, les champs électrique et magnétique sont *en phase*. (Pouvez-vous démontrer cela expérimentalement et par le calcul ?) Les surfaces formées par tous les points où le champ est d'intensité maximale sont des plans parallèles, espacés de la moitié d'une longueur d'onde, qui se déplacent dans la direction de propagation.

Après que Maxwell eut prévu l'existence des ondes électromagnétiques, entre 1885 et 1889, Heinrich Hertz* les découvrit et les étudia. Il fabriqua un émetteur et un récepteur

* Heinrich Rudolf Hertz (n. Hambourg 1857, d. Bonn 1894) fut un important physicien expérimentateur et théoricien hambourgeois. L'unité de la fréquence est baptisée d'après son nom. Malgré son décès prématuré,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

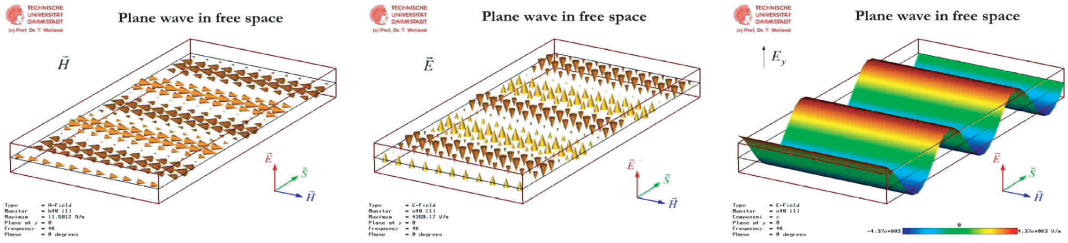


FIGURE 33 Une onde électromagnétique plane, monochromatique et linéairement polarisée, indiquant l'évolution du champ électrique, du champ magnétique, et à nouveau du champ électrique, par une seconde représentation. (© Thomas Weiland)

FIGURE 34 Une des premières antennes émettrices (à gauche) et réceptrices complètes (à droite) d'ondes électromagnétiques.

très simples pour des ondes de 2 GHz. Les ondes situées autour de cette fréquence sont utilisées dans la dernière génération de téléphones portables. Ces ondes sont maintenant appelées *ondes radio*, puisque les physiciens ont tendance à désigner par *rayonnement* tout champ de force en déplacement, recyclant de manière quelque peu incorrecte un mot grec qui signifiait au départ « émission de lumière ».

Aujourd'hui, l'expérience de Hertz peut être refaite d'une manière nettement plus simple. Comme l'indique la Figure 35, un budget de quelques euros est suffisant pour activer à distance une diode émettrice de lumière avec un allume-gaz. (Après chaque activation, il faut délicatement tapoter sur le détecteur d'ondes radio, afin d'être prêt pour l'activation suivante.) En attachant des fils métalliques plus longs comme antennes et pour la terre, on peut permettre à ce dispositif d'atteindre des distances de transmission allant jusqu'à 30 m.

Hertz mesura aussi la vitesse de ces ondes. En fait, vous pouvez également mesurer cette vitesse chez vous, avec une barre de chocolat et un (vieux) four à micro-ondes de cuisine. Un four à micro-ondes émet des ondes radio à 2,5 GHz – pas très loin de la grandeur de Hertz. À l'intérieur du four, celles-ci forment des ondes permanentes. Placez simplement la barre de chocolat (ou un morceau de fromage) dans le four et arrêtez-le dès que

Hertz fut une figure centrale dans le développement de l'électromagnétisme, dans l'interprétation de la théorie de Maxwell et dans la révélation de la technologie des communications radio. Vous en trouverez plus à son sujet à la page 162.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

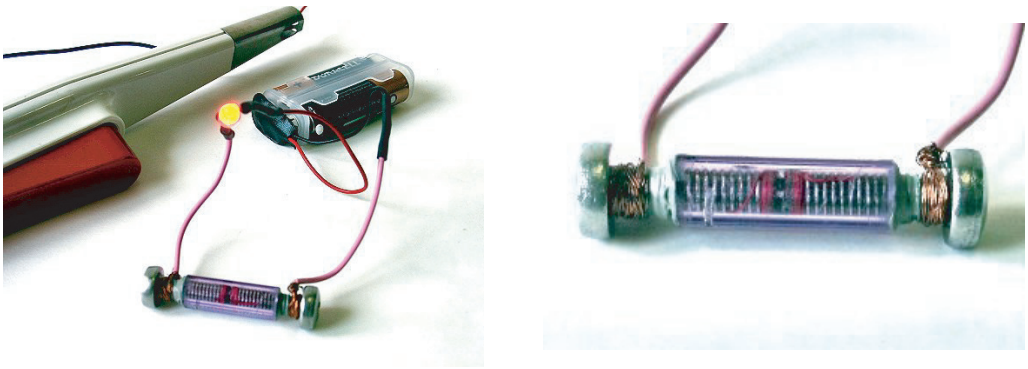


FIGURE 35 L'émetteur le plus simple possible : un allume-gaz et un fil métallique, et le récepteur le plus simple possible, construit avec un groupe de piles, une diode émettrice de lumière et un détecteur d'ondes radio élémentaire constitué d'un logement de stylo-bille, de deux vis et d'un peu de poudre métallique. (© Guido Pegna)

celle-ci commence à fondre. Vous remarquerez que la barre fond à des points régulièrement espacés. Ces emplacements sont distants de la moitié d'une longueur d'onde. Avec la valeur mesurée de la longueur d'onde et de la fréquence, la vitesse de la lumière et des ondes radio découle simplement du produit de ces deux quantités.

Si vous n'êtes pas convaincu, vous pouvez mesurer cette vitesse directement en téléphonant à un ami situé sur un autre continent, si vous pouvez vous assurer que vous utilisez bien une communication par satellite (choisissez un opérateur bon marché). Il y a environ une demi-seconde de délai supplémentaire entre la fin d'une phrase et la réponse de votre ami, comparé à une conversation normale. Durant cette demi-seconde, le signal monte jusqu'au satellite géostationnaire, redescend et emprunte au retour le même chemin. Cette demi-seconde donne une vitesse de $c \approx 4 \cdot 36\,000\,\mathrm{km}/0{,}5\,\mathrm{s} \approx 3 \cdot 10^5\,\mathrm{km/s}$, ce qui est proche de la valeur exacte. Les radioamateurs qui réfléchissent leurs signaux sur la Lune peuvent réaliser la même expérience et parvenir à une précision accrue.

Mais Maxwell en fit davantage. Il entérina des prédictions antérieures qui stipulaient que la *lumière* elle-même est une solution de l'équation (45) et par conséquent une onde électromagnétique, quoique avec une fréquence beaucoup plus élevée. Regardons comment nous pouvons le vérifier.

Il est facile de confirmer les propriétés *ondulatoires* de la lumière ; en réalité, elles étaient déjà connues bien longtemps avant Maxwell. En fait, le premier à suggérer que la lumière est (en quelque sorte) une onde fut, autour de l'an 1678, l'immense physicien Christiaan Huygens. Vous pouvez confirmer que la lumière est une onde avec vos propres doigts. Placez simplement votre main à un ou deux centimètres de vos yeux, regardez en direction du ciel à travers la brèche située entre le majeur et l'index et laissez ces deux doigts en contact. Vous verrez un certain nombre de lignes sombres traversant cette ouverture. Ces lignes représentent le motif d'interférences formé par la lumière derrière la fente produite par les doigts. L'*interférence* est le nom donné aux variations d'amplitude qui surgissent lorsque plusieurs ondes se superposent*. Ces motifs d'interférences dépendent de l'espacement entre les doigts. Cette expérience vous permet donc d'esti-

Page ??

Défi 89 s * Où l'énergie se retrouve-t-elle dans une figure d'interférences ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 36 Les arcs-en-ciel primaire et secondaire, et les arcs surnuméraires au-dessous de l'arc primaire. (© Antonio Martos et Wolfgang Hinz)

mer la longueur d'onde de la lumière, et ainsi, si vous connaissez sa vitesse, sa fréquence.
Défi 90 s Pouvez-vous y parvenir ?

Anciennement, un autre effet était central pour convaincre quiconque que la lumière est une onde : les arcs-en-ciel surnuméraires, ces arcs supplémentaires situés en dessous de l'arc-en-ciel principal ou primaire. Si nous observons attentivement un arc-en-ciel, sous l'arc principal rouge–jaune–vert–bleu–violet, nous remarquons des arcs supplé-
Réf. 39 mentaires plus minces vert, bleu et violet. En fonction de l'intensité de l'arc-en-ciel, plusieurs de ces arcs-en-ciel surnuméraires peuvent être perçus. Ils sont dus à un effet d'interférence, comme Thomas Young l'a montré autour de 1803*. En réalité, la distance de renouvellement des arcs supplémentaires dépend du rayon moyen des gouttelettes d'eau qui les engendrent. (Des détails concernant les arcs-en-ciel ordinaires sont fournis ci-
Page 97 dessous.) Les arcs-en-ciel surnuméraires représentaient une pièce à conviction majeure pour persuader les gens que la lumière est une onde. Il semble que, à cette époque, soit les scientifiques ne croyaient pas en leurs propres doigts, soit ils n'en avaient pas.

Il existe de nombreuses autres manières de rendre incontestable le caractère ondulatoire de la lumière. La plus magnifique est probablement une expérience dirigée par une équipe de physiciens hollandais en 1990. Ils quantifièrent tout simplement la lumière
Réf. 40 transmise à travers une *fente* située sur une plaque métallique. Il s'avéra que l'intensité diffusée dépendait de la largeur de cet interstice. Leur résultat étonnant est indiqué sur la Figure 37. Pouvez-vous expliquer l'origine des paliers d'intensité inattendus présents
Défi 91 pe dans cette courbe ?

De nombreuses autres expériences concernant la création, la détection et la mesure des ondes électromagnétiques ont été réalisées au cours des dix-neuvième et vingtième

* Thomas Young (Milverton 1773–Londres 1829) lisait la Bible à deux ans, et parlait le latin à quatre ans. De docteur en médecine, il devint professeur de physique. Il introduisit le concept d'*interférence* en optique, donnant ainsi une explication aux anneaux de Newton et aux arcs-en-ciel surnuméraires. Il fut le premier à déterminer la *longueur d'onde* de la lumière, un concept qu'il introduisit également, et sa dépendance en fonction de la couleur. Il fut aussi le premier à déduire l'explication de la vision en trois couleurs de l'œil et, après avoir lu la découverte de la polarisation, interpréta la lumière comme une onde transversale. En bref, Young découvrit la plupart des choses que les étudiants apprennent au lycée concernant la lumière. Il possédait un talent universel : il travailla également sur le déchiffrage des hiéroglyphes, sur la construction des navires et sur des problèmes d'ingénierie. Young collabora avec Fraunhofer et Fresnel. En Grande-Bretagne, ses idées sur la lumière ne furent pas acceptées, car les partisans de Newton anéantissaient toutes les conceptions opposées. Vers la fin de sa vie, ses résultats furent finalement diffusés dans la communauté des physiciens par Fresnel et Helmholtz.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

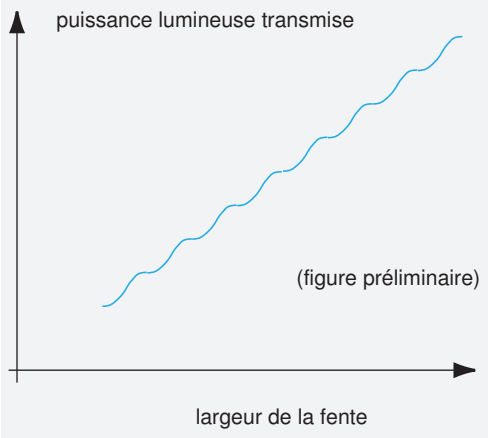


FIGURE 37 Puissance lumineuse transmise à travers une fente en fonction de sa largeur.

FIGURE 38 Deux faisceaux gaussiens qui interfèrent selon un angle donné. (© Rüdiger Paschotta)

siècles. Par exemple, en 1800, William Herschel découvrit la *lumière infrarouge* en uti-
Défi 92 s lisant un prisme et un thermomètre. (Pouvez-vous deviner comment ?) En 1801, Johann Wilhelm Ritter (1776–1810), une figure plus que colorée du romantisme naturel, découvrit la *lumière ultraviolette* en faisant usage de chlorure d'argent, AgCl, et également d'un prisme. Le résultat de toutes ces expériences établit que les ondes électromagnétiques peuvent être caractérisées essentiellement par leur longueur d'onde ou leur
Page 80 fréquence. Les principales catégories sont listées dans le Tableau 12. Pour la lumière visible, la longueur d'onde se situe entre 0,4 µm (violet) et 0,8 µm (rouge).

À la fin du vingtième siècle, la confirmation définitive du caractère ondulatoire de la lumière devint possible. En menant des expériences plutôt sophistiquées, des chercheurs
Réf. 41 mesurèrent *directement* la fréquence d'oscillation de la lumière. Cette valeur, située entre 375 et 750 THz, est si élevée que sa détection demeura impossible pendant longtemps. Mais avec ces expériences modernes la relation de dispersion (46) de la lumière a finale-
Réf. 42 ment été confirmée dans tous ses aspects.

Polarisation et électromagnétisme

Au point où nous sommes, il nous reste une question sur la lumière. Si celle-ci oscille, dans quelle direction le fait-elle ? La réponse est dissimulée dans le paramètre A_0 de l'expression (45). Les ondes électromagnétiques oscillent dans des directions *perpen-*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 39 Le même arc-en-ciel dans le domaine visible et dans l'infrarouge, révélant que l'infrarouge vient avant le rouge. (© Stefan Zeiger)

diculaires à leur propagation. Par conséquent, même pour une fréquence et une phase identiques, les ondes peuvent encore différer sur un point : elles peuvent avoir des directions de *polarisation* distinctes. Par exemple, la polarisation des émetteurs radio détermine si les antennes radio des récepteurs doivent être positionnées horizontalement ou verticalement. La polarisation est facilement perçue, également pour la lumière, par exemple en la révélant à travers un film plastique tendu. Lorsque la polarisation de la lumière fut découverte en 1808 par le physicien français Louis Malus (1775–1812), celle-ci établit de manière définitive la nature ondulatoire de la lumière. Malus la découvrit alors qu'il était en train d'étudier les images doubles mystérieuses engendrées par la calcite, un cristal transparent que l'on trouve dans de nombreux minerais. La calcite ($CaCO_3$) sépare les faisceaux lumineux en deux – il est *biréfringent* – et les polarise différemment. C'est la raison pour laquelle la calcite possède une place particulière dans chaque collection minéralogique.

Si jamais vous parvenez à détenir un morceau de calcite transparent, ne ratez surtout pas l'occasion de regarder un texte écrit à travers celui-ci. La Figure 40 en illustre deux exemples. (Pouvez-vous montrer que la *triréfringence*, si elle est définie comme étant la création de trois images, ne peut pas exister ?)

Défi 93 d

Par ailleurs, l'œil humain est pratiquement incapable de détecter la polarisation, contrairement aux yeux de nombreux insectes, araignées et certains oiseaux. Les abeilles communes tirent profit de la polarisation pour déduire la position du Soleil, même s'il est caché derrière les nuages, et utilisent cet effet pour se déplacer. Certains scarabées du genre *Scarabeus* emploient même la polarisation du clair de lune pour pouvoir se repérer, et de nombreux insectes utilisent la polarisation de la lumière du soleil pour distinguer les surfaces des points d'eau des mirages. (Pouvez-vous deviner comment ?) Mais en

Réf. 43

Défi 94 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

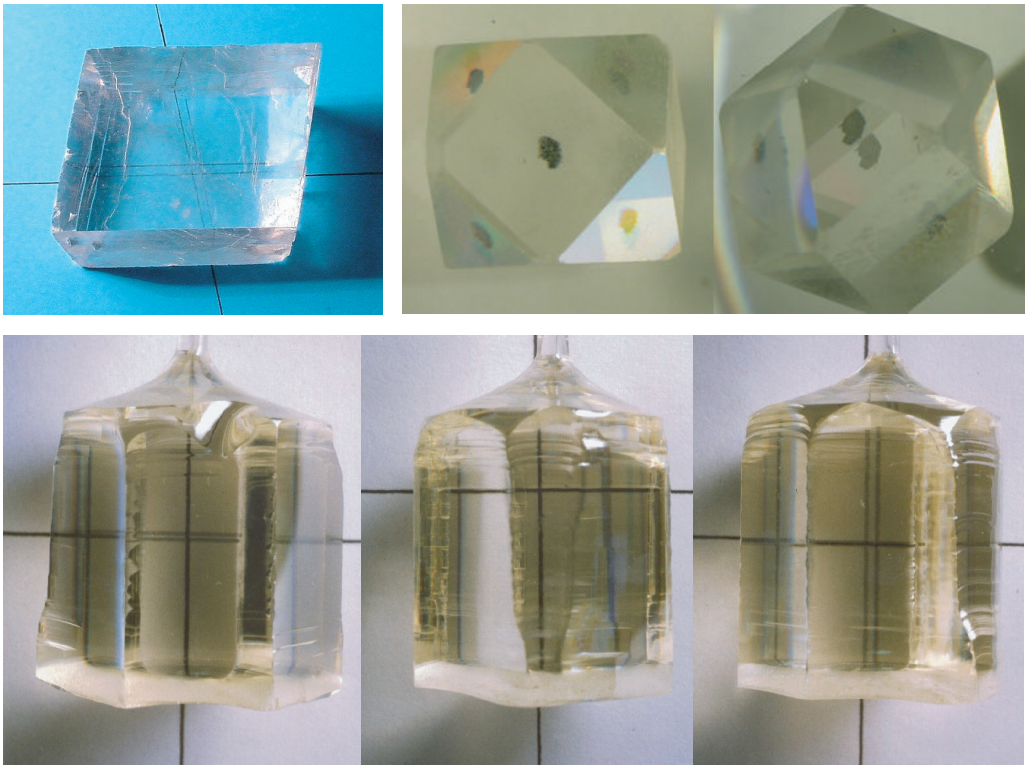


FIGURE 40 La biréfringence dans les cristaux : calcite posée sur des lignes croisées (en haut à gauche, cristal de 4 cm environ) ; rutile posé sur une tache d'encre, photographié le long de l'axe optique (milieu) et selon un angle donné (en haut à droite, cristal d'une taille d'environ 1 cm) ; et cristal de vanadate de sodium octogonal dopé au manganèse, exhibant *trois* comportements distincts (en bas, cristal d'un diamètre de 1,9 cm). (© Roger Weller/Cochise College, Brad Amos, Martin Pietralla)

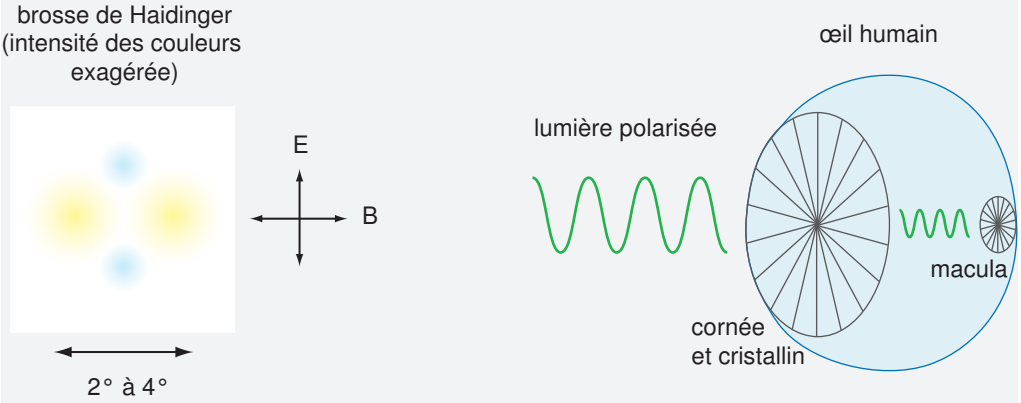


FIGURE 41 La brosse de Haidinger et son origine située dans l'œil humain.

Réf. 44 1844, le minéralogiste autrichien Wilhelm Haidinger découvrit que l'œil humain possède la même aptitude : il existe une manière d'observer la polarisation de la lumière à l'aide de celui-ci sans aucun appareil. La meilleure façon de remarquer cet effet consiste à observer, à une distance équivalente à une longueur de bras environ, un écran LCD

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

blanc et à incliner lentement votre tête. Vous remarquerez la présence d'un motif jaune ou bleu–jaune *extrêmement pâle*, large d'environ deux doigts, qui est superposé au fond blanc. Ce motif est appelé *brosse de polarisation* ou *brosse de Haidinger*. Une illustration approximative en est donnée par la Figure 41. Cet effet ténu disparaît après quelques secondes si la tête cesse de tourner le long de la ligne de visée. La brosse de Haidinger est
Réf. 45 due à la biréfringence de la cornée et du cristallin de l'œil humain, et également à la morphologie de la *macula lutea*. La cornée agit comme un polariseur radialement orienté et dépendant de la couleur, puisque la tache jaune agit comme un analyseur radialement orienté. En bref, l'œil humain est véritablement capable de déceler les directions dans lesquelles les champs électrique et magnétique de la lumière oscillent.

Étant jaune, la brosse de Haidinger est également visible avec le ciel bleu, à condition que le temps soit clair. (En réalité, elle est rapidement noyée par les multiples diffusions, et par conséquent elle fournit un test de la transparence de l'atmosphère.) Dans le ciel, la brosse de Haidinger est à peine de la taille de l'ongle du pouce, à la distance du bras. (Cette taille angulaire est égale à la taille angulaire de la macula.) L'axe jaune de cette croix indique la direction du Soleil, si vous regardez dans une direction située à 90° de celui-ci, haut dans le ciel. Pour le constater vraiment clairement, tenez un Polaroid (ou des lunettes de soleil Polaroid) de façon à regarder au travers, et tournez-le autour de la ligne de visée.

Remarquez que toutes les polarisations possibles de la lumière forment un ensemble continu. Cependant, une onde plane générale peut être vue comme la superposition de deux ondes orthogonales linéairement polarisées ayant des amplitudes distinctes et des phases différentes. La plupart des livres montrent des images d'ondes planes électrodynamiquement linéarisées. De manière fondamentale, les champs électriques ressemblent à des vagues généralisées aux trois dimensions, de même que pour les champs magné-
Défi 95 pe tiques, et les deux sont perpendiculaires entre eux. Pouvez-vous entériner cette idée ?

De manière intéressante, une onde plane polarisée en général peut aussi être vue comme la superposition d'*ondes de polarisation circulaire* droite et gauche. Une illustration d'une onde de polarisation circulaire est donnée sur la Figure 42.

Jusqu'ici, il est flagrant que la lumière est une onde. Il est plus compliqué de confirmer que les ondes lumineuses sont en fait *électromagnétiques*. Le premier argument fut donné par Bernhard Riemann en 1858*, qui déduisit que toute onde électromagnétique doit se propager avec une vitesse c donnée par

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \,. \tag{47}$$

Déjà dix ans avant lui, en 1848, Kirchhoff avait remarqué que les valeurs mesurées de chaque côté de l'équation s'accordaient aux erreurs de mesure près. Quelques années plus tard, Maxwell en donnait une éclatante confirmation en déduisant cette expression
Défi 96 pe de l'équation (46). Vous devriez être capable de réitérer cette prouesse. Remarquez que le membre de droite contient des quantités électrique et magnétique, et que le membre

* Bernhard Riemann (n. Breselenz 1826, d. Selasca 1866) fut un mathématicien allemand influent. Il étudia les espaces courbes, et développa plusieurs des fondements mathématiques et conceptuels de la relativité générale, mais il décéda à un âge précoce.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

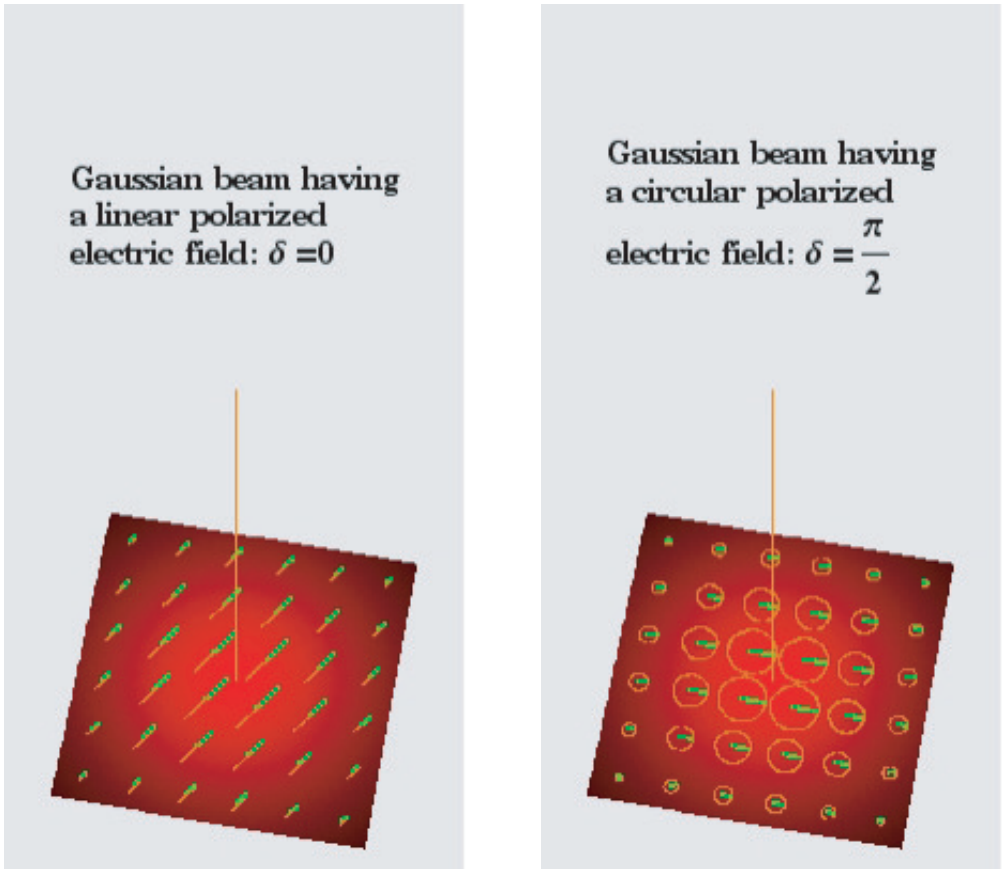


FIGURE 42 Le champ électrique d'une onde électromagnétique gaussienne, de polarisation rectiligne (un faisceau) à côté d'un faisceau gaussien de polarisation circulaire. (© José Antonio Díaz Navas)

de gauche représente une entité optique. L'expression de Riemann unifie ainsi l'électromagnétisme et l'optique.

Évidemment, les gens ne furent pas encore totalement convaincus. Ils recherchaient des moyens supplémentaires de démontrer que la lumière est de nature électromagnétique. Maintenant, puisque les équations d'évolution du champ électrodynamique sont linéaires, des champs électriques ou magnétiques additionnels tout seuls ne doivent pas influencer le mouvement de la lumière. D'autre part, nous savons que les ondes électromagnétiques sont émises uniquement par des charges accélérées, et que toute lumière est émise à partir de la matière. Il découle donc que la matière est emplie de champs électromagnétiques et de charges électriques accélérées. Il s'ensuit que l'influence de la matière sur la lumière peut être comprise à partir de ses champs électromagnétiques internes et, en particulier, que soumettre la matière à un champ électromagnétique *externe* devrait influer sur la lumière qu'elle émet, sur la façon dont la matière interagit avec la lumière ou, plus généralement, sur les propriétés matérielles dans leur ensemble.

Défi 97 e

La recherche des effets de l'électricité et du magnétisme sur la matière a concentré les efforts des physiciens durant plus d'une centaine d'années. Par exemple, les champs élec-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

triques influencent la transmission de lumière dans l'huile, un effet découvert par John Kerr en 1875*. La révélation que certains gaz changent de couleur lorsqu'ils sont soumis à un champ entraîna l'attribution de plusieurs prix Nobel de physique. Avec le temps, on a découvert de nombreuses influences supplémentaires de la matière soumise aux champs sur les propriétés liées à la lumière. Une vaste liste en est donnée dans le tableau de la page 138. Il apparaît que, mis à part quelques exceptions, ces effets peuvent *tous* être décrits par le lagrangien électromagnétique (36) ou, de manière équivalente, par les
Page 62 équations de Maxwell (40). En résumé, l'électrodynamique classique unifie réellement la description de l'électricité, du magnétisme et de l'optique. Il s'avère que tous les phénomènes contenus dans ces champs, de l'arc-en-ciel à la radio et de l'éclair aux générateurs électriques, sont des facettes différentes de l'évolution du champ électromagnétique.

TABLEAU 12 Le spectre électromagnétique.

Fréquence	Long. d'onde	Nom	Principales propriétés	Apparition	Utilisation
$3 \cdot 10^{-18}$ Hz	10^{26} m	**limite des basses fréquences**		lisez la section sur la cosmologie	
< 10 Hz	> 30 Mm	**champs quasi statiques**		champs intergalactique, galactique, stellaire et planétaire, cerveau, poisson électrique	transmission de l'électricité, accélération et déviation des rayons cosmiques
		ondes radio		appareils électroniques	
10 Hz–50 kHz	30 Mm–6 km	ELF	fait le tour du globe, pénètre dans l'eau et le métal	cellules nerveuses, dispositifs électromécaniques	transmission électrique, communication à travers des parois métalliques, communication avec des sous-marins www.vlf.it
50 – 500 kHz	6 km–0,6 km	LF	suit la courbure de la Terre, ressenti par les nerfs (les « nerfs annonciateurs du mauvais temps »)	émis par les orages	communications radio, télégraphie, chauffage par induction
500 – 1 500 kHz	600 m–200 m	MF	réfléchi par le ciel nocturne		radio

* John Kerr (1824–1907) fut un physicien écossais, ami et collaborateur de William Thomson.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Fréquence	Long. d'onde	Nom	Principales propriétés	Apparition	Utilisation
1,5 – 30 MHz	200 m–10 m	HF	fait le tour du monde s'il y a réflexion par l'ionosphère, détruit les dirigeables à air chaud	émis par les étoiles	transmissions radio, radioamateurs, espionnage
15 – 150 MHz	20 m–2 m	VHF	permet le fonctionnement d'émetteurs avec des piles	émis par Jupiter	télécommandes, réseaux privés, TV, radioamateurs, pilotage radio, armée, police, taxi
150 – 1 500 MHz	2 m–0,2 m	UHF	*idem*, propagation de la ligne de vision		radios, talkies-walkies, TV, téléphones portables, Internet par câble, communications satellite, indicateurs de vitesse de vélo
		micro-ondes			
1,5 – 15 GHz	20 cm–2 cm	SHF	*idem*, absorbé par l'eau	ciel nocturne, émis par les atomes d'hydrogène	astronomie radio, utilisé en cuisine (2,45 GHz), télécommunications, radars
15 – 150 GHz	20 mm– 2 mm	EHF	*idem*, absorbé par l'eau		
		infra-rouge	permet la vision nocturne	émis par chaque objet chaud	photographie satellite de la Terre, astronomie
0,3 – 100 THz	1 000 –3 µm	IRC ou infra-rouge lointain		lumière du jour, êtres vivants	voir à travers les vêtements, les enveloppes et les dents
100 – 210 THz	3 µm– 1,4 µm	IRB ou infrarouge moyen		lumière du jour	utilisé pour les communications par fibre optique pour la téléphonie et la télé numérique par câble
210 – 384 THz	1 400– 780 nm	IRA ou infra-rouge proche	pénètre sur plusieurs centimètres dans la peau humaine	lumière du jour, rayonnement des corps chauds	guérison des blessures, rhumatisme, kinésithérapie du sport, rétroéclairage

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Fréquence	Long. d'onde	Nom	Principales propriétés	Apparition	Utilisation
375 – 750 THz	800–400 nm	**lumière**	pas (trop) absorbé par l'air, décelé par l'œil (jusqu'à 900 nm à une puissance suffisante)	chaleur (« lumière chaude »), lasers & réactions chimiques, p. ex. oxydation du phosphore, lucioles (« lumière froide »)	définition de la ligne droite, amélioration de la photosynthèse en agriculture, thérapie photodynamique, traitement de l'hyperbilirubinémie
384 – 484 THz	780–620 nm	rouge	pénètre dans la chair	sang	signal d'alarme, utilisé pour l'imagerie du sein Réf. 46
	700 nm	rouge primaire de laboratoire		lampe au tungstène filtré	couleur de référence pour l'impression, la peinture, l'éclairage et les affichages
484 – 511 THz	620–587 nm	orangé		divers fruits	attire les oiseaux et les insectes
511 – 525 THz	587–571 nm	jaune		la plupart des fleurs	*idem*, meilleure couleur d'arrière-plan pour la lecture d'un texte en noir
525 – 614 THz	571–488 nm	vert	sensibilité maximale de l'œil	algues et plantes	réponse maximale de l'efficacité lumineuse (« sensation de luminosité ») par unité d'énergie lumineuse pour l'œil humain
	546,1 nm	vert primaire de laboratoire		lampe à mercure	couleur de référence
614 – 692 THz	488–433 nm	bleu		ciel, gemmes, eau	
	435,8 nm	bleu primaire de laboratoire		lampe à mercure	couleur de référence
692 – 789 THz	433–380 nm	indigo, violet		fleurs, gemmes	
		ultraviolet			

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Fréquence	Long. d'onde	Nom	Principales propriétés	Apparition	Utilisation
789 – 952 THz	380–315 nm	UVA	pénètre à 1 mm dans la peau, la bronze, produit de la vitamine D, réprime le système immunitaire, provoque des cancers de la peau, détruit le cristallin de l'œil	émis par le Soleil, les étoiles et les flammes	perçu par certains oiseaux, fabrication de circuits intégrés
0,95 – 1,07 PHz	315–280 nm	UVB	*idem*, détruit l'ADN, provoque des cancers de la peau	*idem*	*idem*
1,07 – 3,0 PHz	280–100 nm	UVC	forme les radicaux de l'oxygène dans l'air, tue les bactéries, pénètre à 10 µm dans la peau	émis par le Soleil, les étoiles et les postes de soudure à l'arc	stérilisation, purification de l'eau, retraitement des déchets, fabrication de circuits intégrés
3 –24 PHz	100–13 nm	EUV			cartes du ciel, lithographie sur silicium
		rayons X	pénètre dans les matériaux	émis par les astres, les plasmas et les trous noirs	imagerie du tissu humain
24 – 240 PHz	13–1,3 nm	rayons X mous	*idem*	rayonnement synchrotron	*idem*
> 240 PHz ou > 1 keV	< 1,2 nm	rayons X durs	*idem*	émis lorsque des électrons relativistes frappent la matière	cristallographie, détermination de la structure de la matière
> 12 EHz ou > 50 keV	< 24 pm	**rayons γ**	*idem*	radioactivité, rayons cosmiques	analyse chimique, stérilisation, astronomie
$2 \cdot 10^{43}$ Hz	$\approx 10^{-35}$ m	**limite de Planck**		consultez la dernière partie de ce texte	

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La lenteur des progrès en physique

L'expression que nous connaissons

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \tag{48}$$

concernant la vitesse de la lumière est si étrange que nous devrions être intrigués lorsque nous la voyons. Il manque quelque chose d'essentiel.

En réalité, cette vitesse est *indépendante* du mouvement propre de l'observateur qui mesure le champ électromagnétique. Autrement dit, la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de la source lumineuse et indépendante de la vitesse de l'observateur. Tout cela est implicitement contenu dans l'expression (48). De manière incroyable, durant cinq décennies, *personne* n'a exploré cette étrange conséquence. Résultat : la théorie de la relativité est restée occultée de 1848 à 1905. Comme dans de si nombreuses autres situations, l'avancée en physique fut beaucoup plus lente que nécessaire.

La constance de la vitesse de la lumière est l'idée essentielle qui distingue la relativité restreinte de la physique galiléenne. En ce sens, tout dispositif électromagnétique, faisant usage de l'expression (48), constitue une preuve tangible de la relativité restreinte.

Un autre regard sur le rayonnement électromagnétique

Les ondes électromagnétiques de basse fréquence sont également utilisées de manière courante pour la transmission des communications des téléphones portables, ainsi que des programmes télévisés, radio et par satellites. Comme la lumière, les ondes radio sont dues au mouvement des électrons. Dans la vie de tous les jours, la lumière est (généralement) produite par des électrons accélérés à l'intérieur des atomes ou des molécules. Les ondes radio sont engendrées par des électrons qui sont accélérés dans les métaux.

Les ondes radio peuvent aisément transporter des signaux tout autour de la Terre. En réalité, il apparaît que celles-ci décroissent en intensité comme $1/r$, où r représente la distance à la source. Elles décroissent beaucoup plus lentement que les champs statiques, pour lesquels l'intensité décroît comme $1/r^2$.

La faible dépendance en $1/r$ peut être comprise de manière qualitative à partir du schéma indiqué par la Figure 43. Il retrace le champ électrique autour d'une particule chargée qui subit le mouvement accéléré le plus simple possible : un rebond sur un mur. En fait, le dernier diagramme est suffisant pour montrer que le champ transversal décroît comme $1/r$. Pouvez-vous déduire cette dépendance ?

Défi 98 d

Si nous dessinons cette construction pour une charge qui subit des rebonds répétés, nous obtenons un diagramme ayant des replis réguliers dans ses lignes du champ, qui s'éloignent de la source. Pour une charge éprouvant un mouvement harmonique, nous obtenons le mouvement indiqué sur la Figure 44. Elle montre le mécanisme de l'antenne (ou de la source lumineuse) la plus simple que nous puissions imaginer.

La grandeur du champ électrique transversal peut être utilisée pour déduire la relation entre l'accélération a d'une charge q et la puissance électromagnétique rayonnée P. Premièrement, le champ électrique transversal (calculé dans le dernier exercice) doit être mis au carré, pour donner la densité locale d'énergie électrique. Ensuite, il doit être mul-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

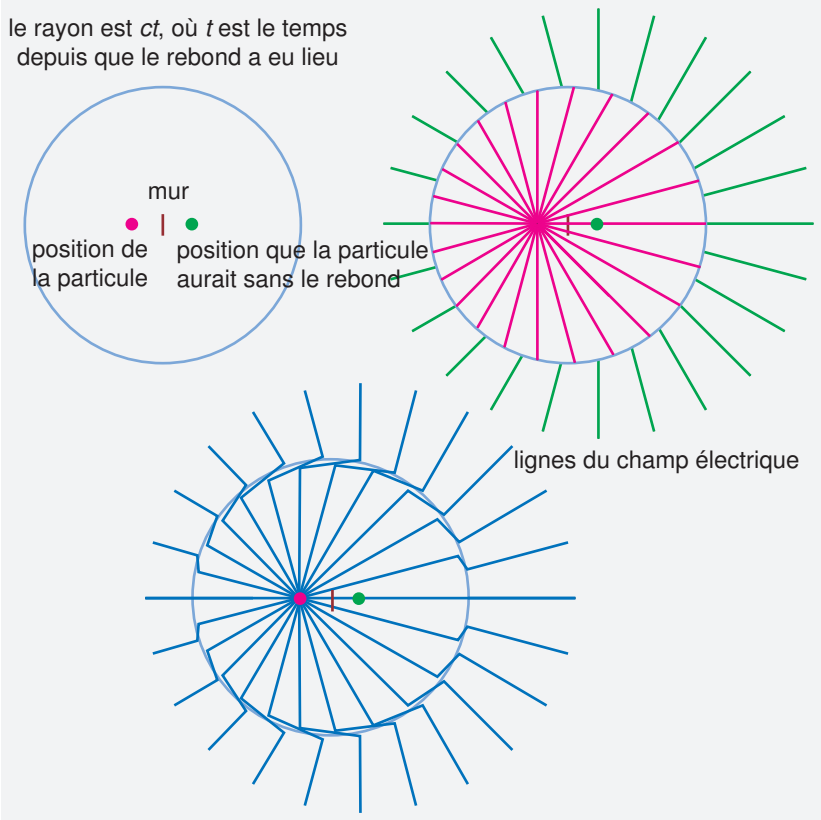


FIGURE 43 Comment confectionner, en trois étapes, le schéma du champ électrique régnant autour d'une particule ayant rebondi contre un mur.

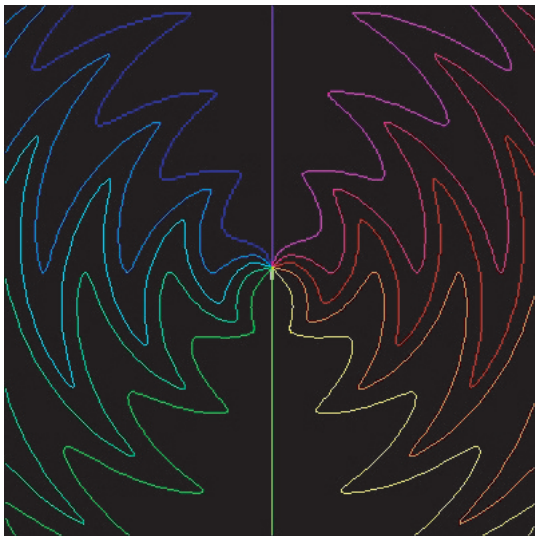


FIGURE 44 Champ électrique autour d'une particule oscillant dans la direction verticale. (© Daniel Schroeder)

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tiplié par 2, pour inclure l'énergie magnétique. Enfin, nous devons intégrer sur l'angle total, ce qui donne un facteur égal à 2/3. Au final, nous obtenons

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\varepsilon_0 c^3} \,. \tag{49}$$

La puissance rayonnée totale P dépend du carré de l'accélération et du carré de la charge qui est accélérée. C'est ce que nous appelons la *formule de Larmor*. Elle montre pourquoi les émetteurs radio ont besoin d'alimentations électriques.

À QUOI RESSEMBLE LE MONDE LORSQUE NOUS CHEVAUCHONS UN FAISCEAU LUMINEUX ?

À la fin du dix-neuvième siècle, le jeune Albert Einstein lut un livre discutant de la vitesse de la lumière. Cet ouvrage s'interrogeait sur ce qui se passerait si un observateur se déplaçait à la même vitesse que la lumière*. Einstein avait beaucoup réfléchi à ce problème, et il se demanda en particulier quelle sorte de champ électromagnétique il observerait dans ce cas. Il expliqua plus tard que cette expérience de pensée le convainquit déjà dès son jeune âge que *rien* ne pourrait voyager à la vitesse de la lumière, puisque le champ observé aurait une propriété que l'on ne rencontre pas dans la nature. Pouvez-
Défi 99 s vous découvrir de laquelle il voulait parler ?

Le fait de chevaucher un rayon lumineux conduirait à d'étranges conséquences.

— Vous n'auriez aucune image dans un miroir, comme un vampire.
— La lumière ne serait pas oscillante, mais serait un champ statique.
— Rien ne bougerait, comme dans le conte de la Belle au bois dormant.

Mais, à des vitesses *proches* de la vitesse de la lumière, les observations seraient également intéressantes.

— Vous observeriez une grande quantité de lumière arrivant devant vous et pratiquement aucune lumière des côtés ou de l'arrière ; le ciel serait bleu/blanc devant vous et rouge/noir derrière.
— Vous remarqueriez que tout défile très très lentement autour de vous.
— Vous ressentiriez l'effet de la plus petite particule de poussière comme celui d'une balle mortelle.

Défi 100 s Pouvez-vous méditer sur des conséquences plus étranges encore ? Il est plutôt rassurant que notre chère planète se déplace relativement lentement à travers son environnement.

LA LUMIÈRE VOYAGE-T-ELLE TOUJOURS EN LIGNE DROITE ?

Habituellement la lumière avance en ligne droite. En réalité, nous utilisons même la lumière pour *définir* « ce qui est droit ». Cependant, il existe un grand nombre d'excep-
Réf. 47 tions que chaque expert du mouvement devrait connaître.

* C'était la série d'ouvrages en vingt volumes d'Aaron Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher*, Duncker, 1873-1874. Durant son adolescence, Einstein les lut, entre 1892 et 1894, avec une « attention palpitante », comme il l'écrivit plus tard.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

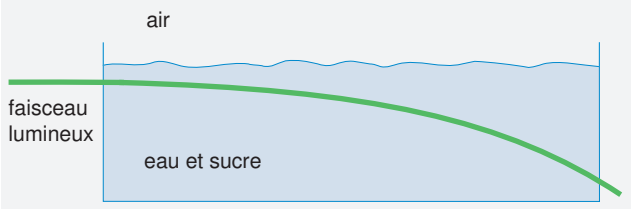


FIGURE 45 L'eau sucrée courbe la lumière.

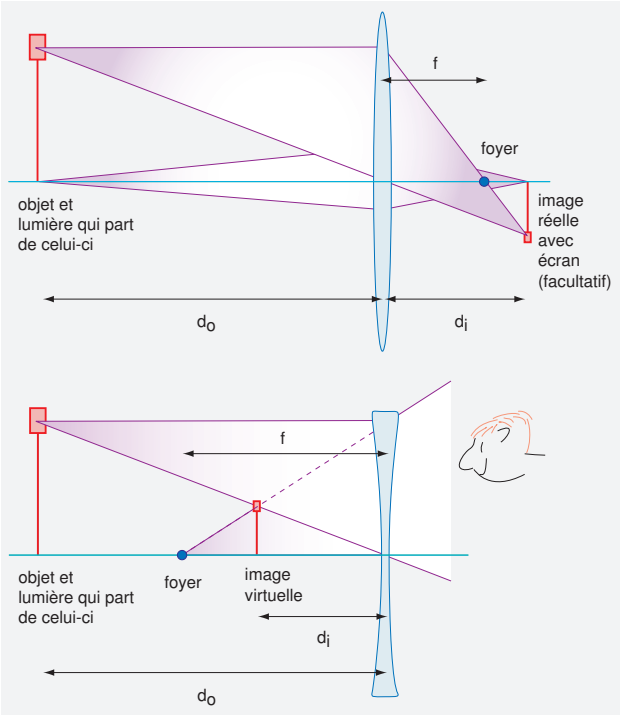


FIGURE 46 L'image réelle produite par une lentille convergente (si elle est utilisée comme ci-dessus) et l'image virtuelle produite par une lentille divergente.

Dans du sirop contenant du sucre dilué, les rayons lumineux se courbent, comme indiqué sur la Figure 45, si la concentration de sucre varie avec la profondeur. En fait, les rayons lumineux fléchissent à chaque fois qu'ils rencontrent des variations matérielles. Cet effet, appelé *réfraction*, modifie également l'aspect de la forme de nos pieds lorsque nous sommes dans notre bain et fait en sorte que les aquariums paraissent moins profonds qu'ils ne le sont réellement. La réfraction est une conséquence de la variation de la vitesse de la lumière d'un matériau à un autre. Êtes-vous capable d'expliquer la réfraction, et donc d'interpréter l'effet du sirop ? Défi 101 s

La réfraction est avant tout employée dans la conception des lentilles. En utilisant du verre au lieu de l'eau, nous pouvons produire des surfaces courbées de telle façon que la lumière puisse être *focalisée*. Les dispositifs de focalisation peuvent être employés pour produire des images. Les deux principaux types de lentilles, avec leurs foyers (points de convergence des rayons lumineux) et les images qu'elles produisent, sont indiqués sur la Figure 46. Lorsqu'un objet est placé entre une lentille convergente et son foyer,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

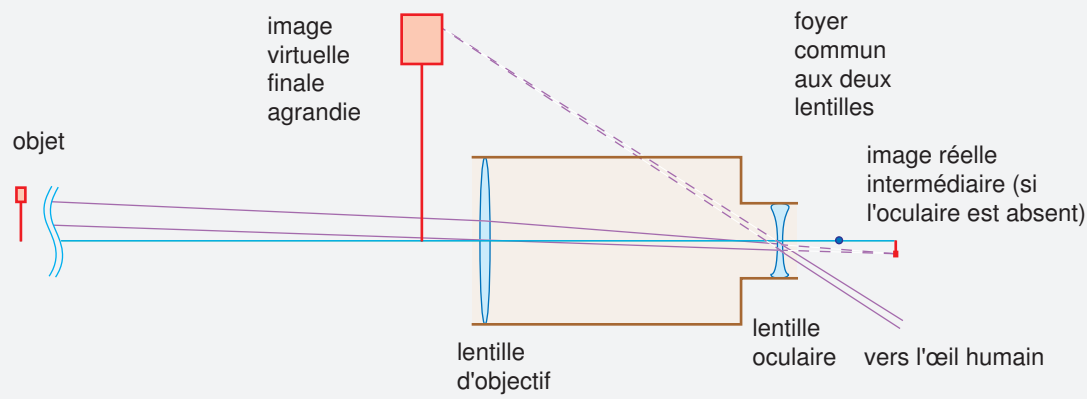


FIGURE 47 La réfraction comme fondement du télescope – indiqué ici selon sa conception hollandaise originale.

celle-ci agit comme une *loupe*. La lentille produit alors une image *réelle*, c'est-à-dire une image qui peut être projetée sur un écran. Dans toutes les autres situations, les lentilles engendrent des images *virtuelles* : de telles images peuvent être vues par l'œil mais ne peuvent pas être projetées sur un écran. La Figure 46 nous permet également de déduire
Défi 102 s l'*équation des lentilles minces* qui relie les longueurs d_o, d_i et f. Quelle est-elle ?

Bien que les lunettes et les lentilles fussent connues depuis l'Antiquité, il fallut attendre le Moyen Âge pour que deux lentilles fussent combinées afin de produire des instruments optiques plus élaborés. Le *télescope* fut inventé en 1608, ou juste avant, par le polisseur de lentilles germano-hollandais Johannes Lipperhey (vers 1570–1619), qui fit fortune en le vendant à l'armée hollandaise. Lorsque Galilée eut écho de cette découverte, il s'en empara immédiatement et l'améliora. En 1609, Galilée réalisa les premières observations astronomiques, qui le rendirent mondialement célèbre. Le modèle du *télescope hollandais* possède un tube court produisant une image brillante et verticale, et son gros-
Défi 103 e sissement est égal au rapport des distances focales des deux lentilles. Il est encore utilisé aujourd'hui dans les jumelles de théâtre. Un grand nombre de constructions alternatives de télescopes ont été développées au cours du temps*.

Une autre manière d'agencer les deux lentilles conduit au *microscope*. Pouvez-vous ex-
Défi 104 s pliquer à un non-physicien comment fonctionne un microscope** ? Werner Heisenberg rata son examen de doctorat principalement parce qu'il n'y parvint pas. Ce problème n'est pas ardu, cependant. En réalité, l'inventeur du microscope était un autodidacte

* Un tour d'horizon fascinant à propos de ce que les gens ont accompli dans ce domaine jusqu'à ce jour est développé par PETER MANLY, *Unusual Telescopes*, Cambridge University Press, 1991, et HENRY C. KING, *The History of the Telescope*, Dover, 2003.

Des images peuvent également être réalisées avec des miroirs. Puisque les miroirs sont plus économiques et plus faciles à fabriquer pour des reproductions d'images de haute précision, la majorité des grands télescopes ont un miroir à la place de la lentille primaire.

Par ailleurs, les télescopes existent également dans la nature. De nombreuses araignées possèdent deux types d'yeux. Les plus gros, conçus pour la vision de loin, possèdent deux lentilles agencées de la même manière que dans les télescopes.

** Si vous ne le pouvez pas, lisez le magnifique ouvrage d' ELIZABETH M. SLATER & HENRY S. SLATER, *Light and Electron Microscopy*, Cambridge University Press, 1993.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 48 L'observation de ce graphique sous des grossissements plus importants révèle la dispersion de l'œil humain : les lettres flottent à différentes profondeurs.

du dix-septième siècle : le technicien hollandais Antoni Van Leeuwenhoek (1632–1723) gagna sa vie en vendant plus de cinq cents exemplaires de son microscope à ses contemporains. (Cela est un petit peu exagéré : Van Leeuwenhoek n'utilisait qu'une lentille.)

Aucun schéma du trajet d'un rayon, fût-il celui d'une simple lentille, d'un télescope ou d'un microscope, n'est véritablement complet si l'œil, intégrant son cristallin et sa rétine, est absent. Pouvez-vous conclure et vous convaincre que ces dispositifs fonctionnent vraiment ?

Défi 105 pe

La réfraction est généralement dépendante de la couleur. Pour cette raison (et afin de compenser les autres erreurs dans la formation des images par la lentille, que nous appelons *aberrations*) les microscopes ou les appareils photographiques possèdent plusieurs lentilles, constituées de matériaux différents. Elles compensent les effets sur la couleur, qui sinon engendrent la coloration de la bordure des images. La dépendance en fonction de la couleur de la réfraction dans les gouttelettes d'eau est également à la base de l'arc-en-ciel, comme indiqué plus bas. La réfraction dans les cristaux de glace situés dans l'atmosphère constitue le fondement des halos lumineux et de nombreux autres phénomènes lumineux que l'on aperçoit souvent autour du Soleil et de la Lune.

Page 97

Réf. 48

L'œil humain possède aussi une réfraction dépendante de la couleur. (Nous savons que, pour le fonctionnement de l'œil, la courbure de la cornée est plus importante que la puissance réfringente du cristallin, parce que celui-ci est immergé dans un milieu ayant quasiment le même indice de réfraction, limitant ainsi les effets de la réfraction.) La réfraction dépendante de la couleur n'est pas corrigée dans l'œil, mais dans le cerveau. En fait, la dispersion due au cristallin peut être remarquée si cette correction est rendue impossible, par exemple lorsque des lettres rouges ou bleues sont imprimées sur un fond noir, comme indiqué sur la Figure 48. Nous avons l'impression que les lettres rouges flottent devant les lettres bleues. Pouvez-vous montrer comment la dispersion conduit à cet effet de flottaison ?

Défi 106 s

Une deuxième observation importante est que la lumière peut traverser les interfaces et se propager d'un milieu à un autre. Cet effet fut dénommé *diffraction* par Francesco Grimaldi dans son ouvrage *Physico-mathesis de lumine*, publié en 1665. Grimaldi étudia très attentivement les ombres. Il découvrit ce que chacun apprend dorénavant au lycée : la lumière se propage d'un milieu à un autre de la même manière que le son, et la diffraction de la lumière est due à la nature ondulatoire de cette dernière. (Newton s'intéressa à l'optique après avoir lu Grimaldi ; il récusa alors à tort ses conclusions.)

Réf. 49

À cause de la diffraction, il est impossible de produire des faisceaux lumineux strictement parallèles. Par exemple, chaque rayon laser diverge d'une certaine quantité minimale, appelée *limite de la diffraction*. Peut-être savez-vous que les réflecteurs les plus coûteux au monde sont situés sur la Lune, où ils ont été déposés par les missions Lunokhod

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

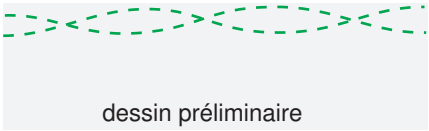


FIGURE 49 Dans certains matériaux, les rayons lumineux peuvent spiraler l'un autour de l'autre.

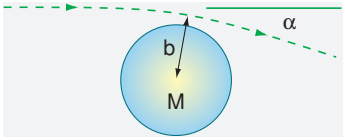


FIGURE 50 Les masses courbent la lumière.

Réf. 50 et Apollo. Pouvez-vous déterminer ce que devient la largeur d'un rayon laser ayant une divergence minimale quand il parvient à la Lune et retourne vers la Terre, en supposant qu'il avait une largeur de 1 m lorsqu'il a quitté la Terre ? De quelle largeur serait-il à son Défi 107 s retour s'il l'avait été de 1 mm au départ ? En bref, la diffraction et l'existence impossible des faisceaux parallèles confirment que la lumière est une onde.

La diffraction implique que les images parfaitement tranchées n'existent pas : il y a une *limite sur la résolution*. Cela est vrai pour chaque instrument optique, y compris l'œil. La résolution de l'œil est comprise entre une et deux minutes d'arc, c'est-à-dire entre 0,3 et 0,6 mrad. Cette limite est en partie due à la taille finie de la pupille. (C'est pourquoi le fait de fermer légèrement les paupières permet de voir de manière plus claire.) En pratique, la résolution de l'œil est souvent limitée par les aberrations chromatiques et par les imperfections dans la forme de la cornée et du cristallin. (Pouvez-vous vérifier ces grandeurs et leurs interprétations par le calcul ? Est-il vrai que le nombre de cônes présents Défi 108 d dans l'œil est finement ajusté à sa résolution ?) Par conséquent, il existe par exemple une distance maximale pour laquelle les hommes parviennent encore à distinguer les deux Défi 109 s phares d'une voiture. Pouvez-vous l'évaluer ?

Les limites sur la résolution font également qu'il est impossible de voir la Grande Muraille au nord de la Chine depuis la Lune, contrairement à ce qu'on affirme souvent. Dans les quelques parties qui ne sont pas encore en ruines, le mur fait environ 6 mètres de large, et même s'il projette une ombre assez vaste durant la matinée ou la soirée, l'angle qu'il sous-tend est depuis la Lune de moins d'une seconde d'arc, de telle façon qu'il est parfaitement invisible pour l'œil humain. En réalité, trois cosmonautes différents qui ont voyagé jusqu'à la Lune ont attentivement scruté la Terre et ont confirmé que cette Réf. 51 affirmation est absurde. Ce récit est l'un des canulars les plus persistants. (Est-il possible Défi 110 pe de voir la Muraille depuis la Station spatiale ?) Les objets les plus vastes construits par l'homme sont les polders des terres conquises sur la mer aux Pays-Bas ; ils *sont* visibles depuis l'espace proche de l'atmosphère. La plupart des grandes mégalopoles le sont également, de même que les autoroutes de Belgique la nuit, leur luminosité éclatante font qu'elles se détachent très nettement du côté obscur de la Terre.

La réfraction conduit aussi à un célèbre effet où la lumière semble contourner les obstacles : le *mirage*. La Figure 52 montre des photographies d'un mirage *supérieur* inversé et d'un mirage *inférieur* droit. Le mirage inférieur inversé, plus commun, est souvent Réf. 52 aperçu sur des routes brûlantes. On rencontre également des mirages supérieurs droits. Ils sont tous engendrés par la réfraction et leur apparition dépend du profil de température présent dans l'air.

La diffraction signifie également que, derrière un petit disque éclairé le long de son axe, le centre de la zone ombragée révèle, contre toute attente, un point lumineux comme

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

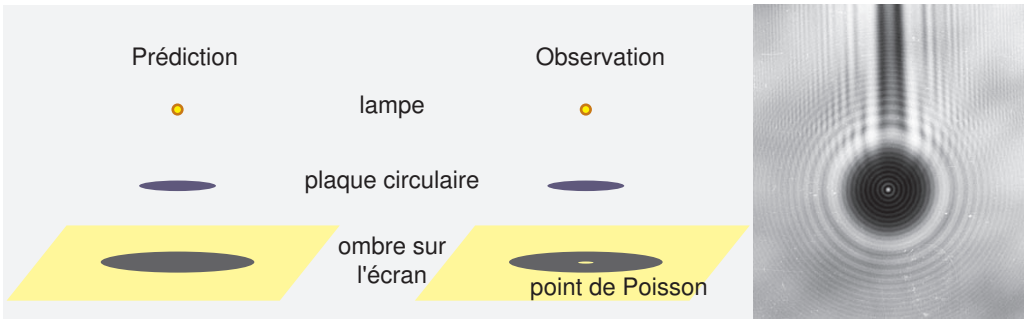


FIGURE 51 Les ombres indiquent que la lumière est une onde : l'attente naïve (à gauche), négligeant l'aspect ondulatoire, et la véritable observation (à droite) de l'ombre d'un objet circulaire. (© Christopher Jones)

indiqué sur la Figure 51. Ce « trou » dans l'ombre fut prédit en 1819 par Denis Poisson (1781–1840) afin de démontrer à quelles conséquences absurdes la théorie ondulatoire de la lumière pouvait conduire. Il avait juste lu la description mathématique de la diffraction développée par Augustin Fresnel* sur la base de la description ondulatoire de la lumière. Mais peu après, François Arago (1786–1853) observa réellement le point de Poisson, ridiculisant ainsi Poisson, rendant Fresnel célèbre et amorçant l'approbation générale concernant les propriétés ondulatoires de la lumière.

Des champs électromagnétiques additionnels n'influencent généralement pas directement la lumière, puisque la lumière ne possède pas de charge et parce que les équations de Maxwell sont linéaires. Mais dans certains matériaux les équations sont non linéaires, et ce n'est alors plus la même histoire. Par exemple, dans certains matériaux photoréfringents, deux faisceaux lumineux proches peuvent *s'entortiller* l'un autour de l'autre, comme le montrèrent Segev et ses collègues en 1997.

Réf. 53

Un ultime expédient permettant de courber la lumière est la gravité, comme il a déjà été discuté dans les chapitres traitant de la gravitation universelle et de la relativité générale. Les effets de la gravité qui agit entre deux rayons lumineux y ont également été traités.

Page 239

En guise de remarque, la lumière qui est réfléchie ou diffusée par des objets ne peut pas être considérée comme étant courbée, elle est mieux décrite comme étant de la lumière qui est absorbée puis réémise. Cependant, la diffusion représente un mécanisme prépondérant de modification de la direction de la lumière : sans la diffusion, nous ne verrions presque rien. La vue est la détection de la lumière diffusée.

En résumé, la lumière voyage en ligne droite uniquement si elle voyage *loin de toute matière*. Dans la vie quotidienne, « loin » signifie plus de quelques millimètres seulement, parce que tous les effets gravitationnels et électromagnétiques sont négligeables à ces distances, principalement à cause de la vitesse réellement supersonique de la lumière.

* Augustin Jean Fresnel (1788–1827), ingénieur et occasionnellement physicien. Il publia en 1818 son article majeur sur la théorie ondulatoire pour laquelle il obtint le prix de l'Académie française des sciences en 1819. (Le « s » de son nom ne se prononce pas.) Pour améliorer sa situation financière, il travailla dans la commission chargée des phares, dans laquelle il développa les lentilles de Fresnel désormais connues. Il mourut prématurément, en partie d'épuisement dû à son surcroît de travail.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

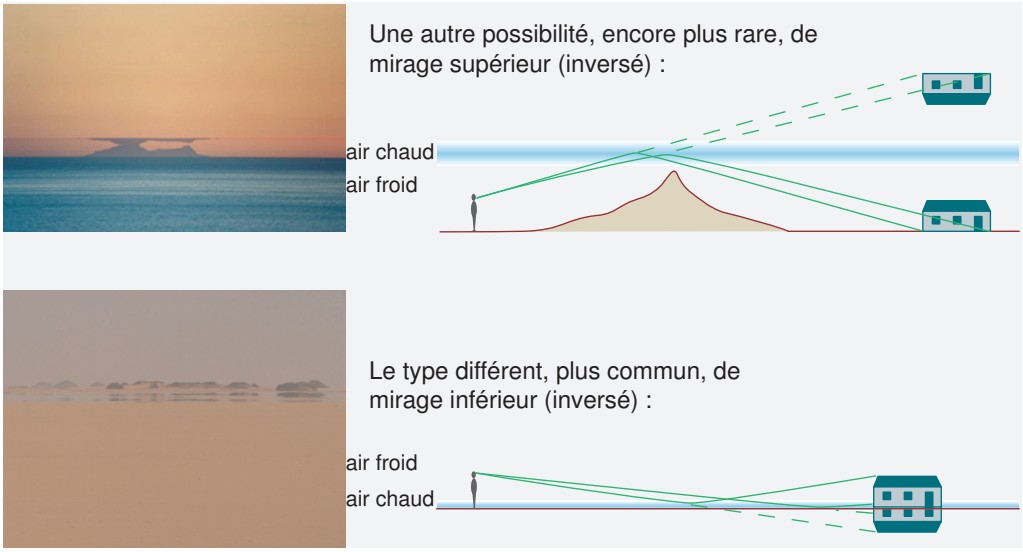


FIGURE 52 Une réflexion efficace, due à la réfraction dans une couche d'air chaud, est à la base des mirages et peut conduire à des effets saisissants, tels que le mirage supérieur inversé (en haut à gauche et à droite), le mirage inférieur droit (en bas à gauche) et le mirage inférieur inversé (en bas à droite). (photographies © Thomas Hogan et Andy Barson)

FIGURE 53 Le dernier miroir de la fournaise solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées. (© Gerhard Weinrebe)

La focalisation de la lumière

Si nous construisons une grosse lentille ou un miroir incurvé, nous pouvons collecter la lumière du Soleil et la focaliser en un unique point. Chacun dans son enfance a utilisé une lentille convergente pour réaliser de cette manière, par incandescence, des points noirs sur des journaux. En Espagne, des chercheurs dotés de moyens ont même construit un miroir courbe aussi grand qu'une habitation, afin d'étudier l'utilité de l'énergie solaire et le comportement des matériaux à haute température. De façon élémentaire, le miroir fournit une manière économique de réaliser un four incandescent en son foyer. (Et « foyer », au sens de point focal ou « focus », est le mot latin désignant « foyer », au sens de cheminée.)

Les enfants découvrent assez rapidement que des grosses lentilles leur permettent de brûler des choses plus facilement que des petites. Il est évident que le site espagnol est le détenteur du record dans ce domaine. Cependant, il n'est pas sensé de bâtir un miroir

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

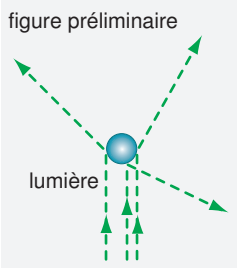


FIGURE 54 Lévitation d'une petite bille de verre à l'aide d'un laser.

encore plus vaste. Quelle que puisse être sa taille, un tel dispositif ne peut pas atteindre
Réf. 95 une température plus élevée que celle de la source lumineuse d'origine. La température de surface du Soleil est d'environ 5 800 K ; en réalité, la température la plus élevée atteinte jusqu'à présent est d'à peu près 4 000 K. Êtes-vous capable de montrer que cette
Défi 111 pe restriction découle de la deuxième loi de la thermodynamique ?

En bref, la nature livre une *limite* à la concentration d'énergie lumineuse. En fait, nous rencontrerons des limites supplémentaires au cours de notre exploration.

Pouvons-nous palper la lumière ?

Si une petite bille de verre est placée sur la tête d'un laser puissant, la bille reste suspendue en l'air, comme indiqué sur la Figure 54*. Cela signifie que la lumière possède une quantité de mouvement. Par conséquent, contrairement à ce que nous avions affirmé au début de notre ascension montagneuse, les images *peuvent* être palpées ! En fait, la facilité avec laquelle les objets peuvent être poussés possède même un nom particulier. Pour les étoiles, nous la dénommons l'*albédo*, et pour des objets en général on l'appelle la *réflectance*, notée r.

Comme chaque type de champ électromagnétique, et comme chaque variété d'onde, la lumière transporte de l'énergie. Le flux d'énergie T par unité de surface et de temps
Défi 112 e est

$$\boldsymbol{T} = \frac{1}{\mu_0}\boldsymbol{E} \wedge \boldsymbol{B} \quad \text{donnant une moyenne} \quad \langle T \rangle = \frac{1}{2\mu_0} E_{\max} B_{\max} \,. \tag{50}$$

Évidemment, la lumière possède également une quantité de mouvement P. Elle est reliée à l'énergie E par

$$P = \frac{E}{c} \,. \tag{51}$$

Défi 113 e En conséquence, la pression p exercée par la lumière sur un corps est donnée par

$$p = \frac{T}{c}(1 + r) \tag{52}$$

* L'objet le plus lourd qui a été mis en lévitation avec un laser pesait 20 g. Le laser employé était énorme, et la méthode tirait également profit de quelques effets complémentaires, tels que les ondes de choc, pour maintenir cet objet en l'air.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 55 La queue de la comète McNaught, photographiée en Australie en 2007. (© Flagstaffotos)

où pour des corps noirs nous avons une réflectance $r = 0$ et pour des miroirs $r = 1$, les autres corps possédant des valeurs situées dans cet intervalle. À combien estimez-vous la quantité de pression due à la lumière du Soleil agissant sur une surface noire d'un mètre carré ? Est-ce pour cette raison que nous ressentons plus de pression dans la journée que dans la nuit ?

Défi 114 s

En fait, un équipement particulièrement délicat est nécessaire pour détecter la quantité de mouvement de la lumière ou, autrement dit, sa pression de rayonnement. Déjà en 1619, Johannes Kepler avait suggéré dans *De cometis* que les queues des comètes existent uniquement parce que la lumière du Soleil frappe les minuscules particules de poussière qui se détachent de celles-ci. Pour cette raison, la queue est toujours dirigée *du côté opposé* au Soleil, comme vous pourrez le vérifier lorsque la prochaine occasion se présentera. Aujourd'hui, nous savons que Kepler avait raison, mais il n'est pas facile de démontrer cette hypothèse.

Défi 115 e

En 1873, William Crookes* inventa le *radiomètre de Crookes* ou *moulin à lumière*. Il avait pour objectif de démontrer l'existence de la pression de rayonnement de la lumière. Le moulin à lumière est constitué de quatre minces ailettes, avec une face noircie et l'autre réfléchissante, qui sont montées sur un axe vertical, comme indiqué sur la Figure 56. Cependant, lorsque Crookes acheva sa construction – elle était analogue à celles qui sont vendues dans les magasins aujourd'hui –, il découvrit comme tout le monde qu'elle tournait dans la mauvaise direction, à savoir que le côté brillant tournait vers la lumière ! (Pourquoi cette direction est-elle surprenante ?) Vous pouvez le vérifier

Défi 116 s

* William Crookes (n. Londres 1832, d. *id.* 1919) fut un chimiste et physicien anglais, président de la Royal Society, découvreur du thallium, et adepte du spiritualisme.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

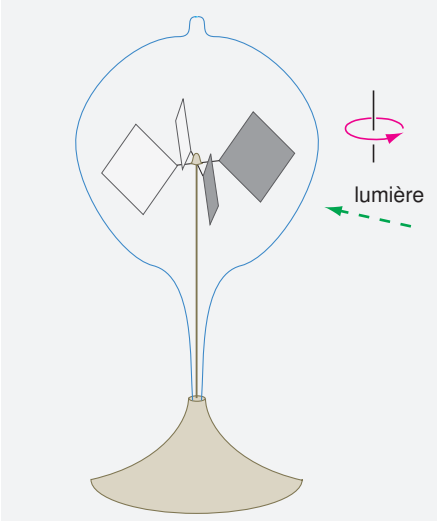


FIGURE 56 Un moulin à lumière du commerce tourne *contre* la lumière.

par vous-même en dirigeant la pointe d'un laser dessus. Ce comportement est demeuré énigmatique pendant quelque temps. Son explication fait appel à la minuscule quantité de gaz résiduel situé dans la sphère en verre, et nous emmènerait trop loin du sujet qui
Réf. 54 nous préoccupe. Ce ne fut qu'en 1901, avec l'avènement de pompes beaucoup plus performantes, que le physicien russe Pyotr/Peter Lebedew parvint à créer un vide suffisamment poussé pour lui permettre de mesurer la pression lumineuse avec un tel radiomètre amé-
Réf. 55 lioré et véritable. Lebedew confirma également la valeur conjecturée pour la pression de la lumière et démontra la justesse de l'hypothèse de Kepler concernant les queues des comètes. Aujourd'hui, il est même possible de concevoir de minuscules hélices qui commencent à tourner lorsqu'elles sont éclairées par la lumière, exactement comme le vent
Réf. 56 fait tourner les pales des moulins à vent.

Mais la lumière ne peut pas seulement toucher et être touchée, elle peut également *saisir*. Dans les années 1980, Arthur Ashkin et son groupe de recherche développèrent de véritables *pincettes optiques* qui nous permettent de manipuler, suspendre et déplacer
Réf. 57 des petites sphères transparentes de 1 à 20 µm de diamètre en utilisant des rayons laser. Il est possible de le faire par l'intermédiaire d'un microscope, de telle sorte que nous pouvons également observer en temps réel ce qui se passe. Cette technique est maintenant employée de manière routinière dans la recherche en biologie, partout dans le monde ; elle a été utilisée, par exemple, pour mesurer la force de fibres musculaires uniques, en fixant chimiquement leurs extrémités à des sphères en verre ou en Téflon, et en exerçant sur elles une traction à l'aide de ces pincettes optiques.

Mais ce n'est pas tout. Dans la dernière décennie du vingtième siècle, plusieurs groupes sont même parvenus à *faire tourner* des objets, réalisant ainsi de véritables *clés*
Réf. 57 *à molette optiques*. Elles sont capables de faire tourner des particules dans une direction ou dans l'autre suivant notre point de vue, en modifiant les propriétés optiques du rayon laser employé pour piéger la particule.

En fait, il n'y a pas à réfléchir énormément pour déduire que si la lumière possède une quantité de mouvement (moment de translation), la lumière circulairement polarisée

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

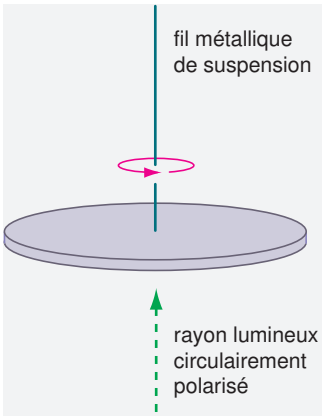


FIGURE 57 La lumière peut faire tourner des objets.

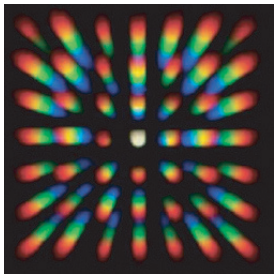


FIGURE 58 Les parapluies décomposent la lumière blanche.

possède aussi un moment *cinétique* (moment de rotation). En réalité, pour une telle onde, le moment cinétique $\boldsymbol{L}$ est donné par

$$\boldsymbol{L} = \frac{E_{\text{nergie}}}{\omega} \,. \tag{53}$$

Défi 117 e
Réf. 58
Défi 118 pe

De façon équivalente, le moment cinétique d'une onde est égal à sa quantité de mouvement fois $\lambda/2\pi$. Pour la lumière, ce résultat était déjà confirmé au tout début du vingtième siècle : un faisceau lumineux peut mettre certains matériaux (lesquels ?) en rotation, comme indiqué sur la Figure 57. Bien évidemment, tout cela fonctionne encore mieux avec un rayon laser. Dans les années 1960, une magnifique démonstration fut menée avec des micro-ondes. Un rayon micro-onde circulairement polarisé engendré par un maser – l'équivalent micro-onde d'un laser – peut mettre une pièce métallique qui l'absorbe en rotation. En réalité, pour un faisceau de symétrie cylindrique, en fonction du sens de rotation, le moment cinétique est soit parallèle soit antiparallèle à la direction de propagation. Toutes ces expériences confirment que la lumière emporte également du moment cinétique, un effet qui jouera un rôle important dans la partie quantique de notre ascension montagneuse.

Nous remarquons que le fait que le moment cinétique soit de l'énergie divisée par la vitesse angulaire ne s'applique pas à toutes les ondes. C'est uniquement le cas pour des ondes constituées de ce qu'en théorie quantique nous qualifierons de particules de spin 1. Par exemple, pour les ondes gravitationnelles le moment cinétique est le *double* de cette valeur, et on s'attend par conséquent à ce qu'elles soient constituées de particules de spin 2.

Réf. 59

Qu'est-ce que cela implique pour les queues des comètes mentionnées ci-dessus ? Ce problème fut définitivement tranché en 1986. Un satellite fut propulsé à une altitude de 110 000 km où on lui fit libérer un nuage de baryum. Ce nuage, visible depuis la Terre, développa rapidement une queue qui était discernable depuis le sol : c'était la première comète artificielle. Il apparaît que la forme des queues des comètes est en partie due aux

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

chocs avec les photons, en partie au vent solaire, et également aux champs magnétiques.

En résumé, la lumière peut toucher et être palpée. Manifestement, si la lumière peut faire tourner des corps, elle peut aussi *être* mise en rotation. Pouvez-vous imaginer comment cela peut être accompli ? Défi 119 s

Guerre, lumière et mensonges

À partir des minuscules effets de l'équation (52) concernant la pression lumineuse, nous déduisons que la lumière n'est pas un outil efficace pour frapper des objets. D'autre part, la lumière est capable de réchauffer des objets, comme nous pouvons le ressentir au soleil ou quand la peau est mise en contact avec un rayon laser d'environ 100 mW ou plus. Pour la même raison, les pointeurs laser bon marché sont également dangereux pour l'œil.

Dans les années 1980, et à nouveau en 2001, un groupe d'individus, qui avaient lu un nombre excessif de romans de science-fiction, parvint à persuader l'armée – qui se laisse facilement berner, aussi, dans ces situations – que des lasers pourraient être employés pour abattre des missiles, et qu'une grande partie de l'argent des contribuables devait être dépensée pour développer de tels lasers. En utilisant la définition du vecteur de Poynting et en considérant un délai de frappe d'environ 0,1 s, êtes-vous capable d'estimer le poids et la taille de la batterie nécessaire pour qu'un tel appareil puisse fonctionner ? Que se passerait-il par temps nuageux ou pluvieux ? Défi 120 pe

D'autres personnes ont tenté de convaincre la NASA d'étudier la faisabilité de la propulsion d'une fusée en utilisant de la lumière émise au lieu de gaz éjectés. Êtes-vous capable d'estimer si cela est éventuellement possible ? Défi 121 pe

Qu'est-ce que la couleur ?

Nous avons vu que les ondes électromagnétiques de certaines fréquences sont visibles. Dans cette étendue, des fréquences différentes correspondent à des couleurs distinctes. (Êtes-vous capable de convaincre un ami à ce propos ?) Mais l'histoire ne s'arrête pas là. De nombreuses couleurs peuvent être produites soit par une longueur d'onde unique, c'est-à-dire par de la lumière *monochromatique*, soit par un *mélange* de plusieurs couleurs différentes. Par exemple, le jaune primaire peut être, s'il est pur, engendré par un faisceau électromagnétique de 575 nm de longueur d'onde ou peut être réalisé par un mélange de vert primaire de 546,1 nm et de rouge primaire de 700 nm. L'œil ne peut pas faire la différence entre ces deux cas, seuls les spectromètres le peuvent. Dans la vie quotidienne, toutes les couleurs se révèlent être des mélanges, à l'exception de celles des réverbères jaunes, des rayons laser et de l'arc-en-ciel. Vous pouvez le vérifier en utilisant un parapluie ou un disque compact : ils décomposent les mélanges de lumière, mais pas les couleurs pures. Défi 122 s Défi 123 e

En particulier, la lumière blanche est un mélange d'une gamme continue de couleurs ayant une intensité donnée par longueur d'onde. Pour vérifier que la lumière blanche est bien un mélange de couleurs, tenez simplement la partie gauche de la Figure 59 si près de votre œil que vous ne puissiez plus distinguer clairement les raies. Les bordures floues des bandes blanches possèdent une nuance de rose ou de vert. Ces couleurs sont provoquées par les imperfections de l'œil humain, dites *aberrations chromatiques*. Les aberrations conduisent au fait que toutes les fréquences de la lumière ne suivent pas le même trajet à

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

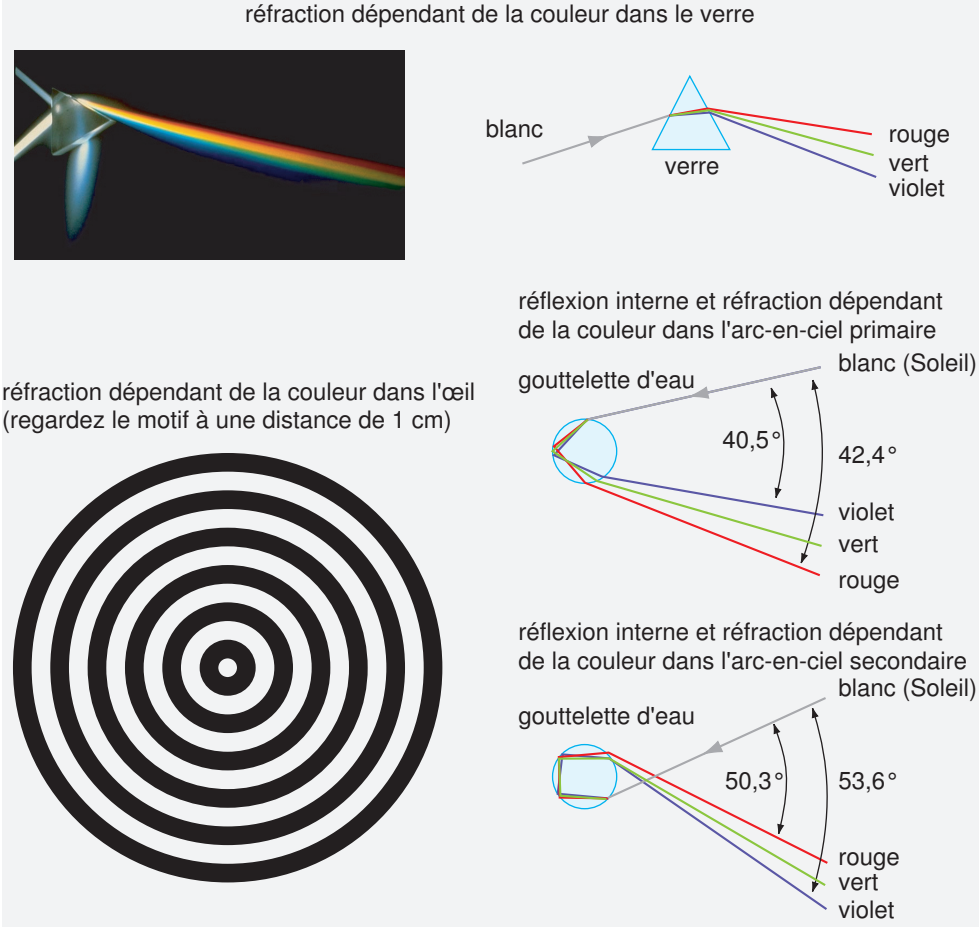


FIGURE 59 La preuve que la lumière blanche est un mélange de couleurs (avec des différences d'angles exagérées). (photographie Susan Schwartzenberg, © Exploratorium www.exploratorium.edu)

travers le cristallin de l'œil, et par conséquent qu'elles heurtent la rétine à des emplacements différents. C'est le même effet qui se produit dans les prismes ou dans les gouttes d'eau à l'origine d'un arc-en-ciel. Par ailleurs, la forme de l'arc-en-ciel nous renseigne sur la forme des gouttelettes d'eau. Pouvez-vous expliciter cette correspondance ?

Défi 124 s

La partie droite de la Figure 59 explique comment les arcs-en-ciel se forment. L'idée centrale est que la réflexion interne qui se produit à l'intérieur des gouttelettes d'eau dans le ciel est responsable de la projection en arrière de la lumière provenant du Soleil, vu que la réfraction, qui est dépendante de la longueur d'onde, à l'interface air–eau est responsable des différentes trajectoires suivies par chaque couleur. Les deux premières personnes qui ont vérifié cette explication furent Theodoricus Teutonicus de Vriberg (v. 1240 à v. 1318) entre 1304 et 1310 et, simultanément, le mathématicien persan Kamal al-Din al-Farisi. Pour contrôler cette interprétation, ils firent quelque chose de simple et élégant, que n'importe qui peut reproduire chez soi. Ils façonnèrent une gouttelette d'eau agrandie en emplissant un mince récipient en verre sphérique (ou cylindrique) avec de l'eau, puis ils envoyèrent un faisceau de lumière blanche dedans. Theodoricus et

Réf. 60

Défi 125 e

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 60 Un flash vert situé au-dessus du soleil couchant et un autre au-dessus de la Lune, indiquant aussi le changement de couleur du contour de la Lune. (© Andrew Young et Laurent Laveder/PixHeaven.net)

al-Farisi relevèrent exactement ce qui est indiqué sur la Figure 59. Avec cette expérience, chacun d'entre eux était capable de reproduire l'angle de l'arc-en-ciel principal ou primaire, sa succession de couleurs, ainsi que l'existence d'un arc-en-ciel secondaire, son angle observé et sa succession de couleurs inversée*. Tous ces arcs sont visibles sur la
Page 74 Figure 36. L'admirable expérience de Theodoricus est parfois considérée comme la plus importante contribution dans l'étude de la nature au Moyen Âge.

À ce propos, l'explication de la Figure 59 n'est pas complète. Elle est dessinée de telle sorte que le rayon de lumière frappe la gouttelette d'eau à un emplacement particulier. Si ce rayon lumineux heurte la gouttelette en d'autres points, les arcs-en-ciel apparaissent à des angles différents, mais alors tous les autres arcs-en-ciel qui sont situés là s'effacent. Seul l'arc-en-ciel visible persiste, car ses angles de déviation sont extrémaux.

Par ailleurs, au coucher du soleil, l'atmosphère elle-même agit aussi comme un prisme, ou plus précisément comme une lentille cylindrique affectée par le sphérochromatisme. Cela signifie que le Soleil est scindé en différentes images, une pour chaque couleur, qui sont légèrement décalées les unes par rapport aux autres, le décalage total
Réf. 62 étant égal à environ 1 % du diamètre. Ainsi, la bordure du Soleil s'en trouve colorée. Si le temps est favorable, si l'air est limpide jusqu'à l'horizon et au-delà de celui-ci, et si le profil de température adéquat est présent dans l'atmosphère, un mirage qui varie en fonction de la couleur apparaîtra. Par conséquent, pendant à peu près une seconde, il sera possible de voir, juste après ou à proximité des images rouge, orange et jaune du soleil couchant, l'image vert-bleu, parfois même bien distincte. C'est le fameux *flash vert*
Réf. 63 décrit par Jules Verne dans son roman *Le Rayon vert*. Il est fréquemment observé sur les plages tropicales, par exemple à Hawaii, et depuis les ponts des navires qui croisent dans
Réf. 62, Réf. 64 les eaux chaudes.

Défi 126 pe * Pouvez-vous deviner où les arcs-en-ciel tertiaire et quaternaire doivent être observés ? Il existe de rares observations rapportées à leur sujet. La chasse pour le signalement de l'arc-en-ciel du cinquième ordre est toujours ouverte. (En laboratoire, nous avons observé des arcs, entourant des gouttelettes, allant jusqu'au
Réf. 61 treizième ordre.) Pour plus de détails, consultez le magnifique site Web sur www.atoptics.co.uk. Il existe plusieurs formules concernant les angles des divers ordres des arcs-en-ciel, qui découlent directement de considérations géométriques mais sont trop compliquées pour être citées ici.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 61 Du lait et de l'eau simulent le ciel du soir. (© Antonio Martos)

Même l'air pur décompose la lumière blanche. Cependant, ce phénomène n'est pas engendré par la dispersion, mais par la diffusion. La diffusion, qui dépend de la longueur d'onde, constitue la raison qui fait que le ciel et les montagnes lointaines paraissent bleus ou que le Soleil paraît rouge au coucher et au lever. (Le ciel paraît noir même pendant le jour sur la Lune.) Vous pouvez reproduire cet effet en regardant à travers de l'eau devant une surface noire ou une ampoule. En ajoutant quelques gouttes de lait dans l'eau, on observe que la lampe devient jaune puis rouge, et que la surface noire devient bleue (comme le ciel vu depuis la Terre en comparaison du ciel observé depuis la Lune), comme l'indique la Figure 61. Plus on ajoute de lait, plus l'effet augmente. Pour cette même raison, les couchers du soleil sont particulièrement rouges après les éruptions volcaniques.

Pour éclaircir la différence qui existe entre les couleurs en physique et la couleur dans la perception humaine et dans le langage, une célèbre découverte linguistique mérite d'être mentionnée : les couleurs dans le langage humain possèdent un *ordre* naturel. Les couleurs sont ordonnées par tous les individus peuplant le monde, qu'ils soient issus de la mer, du désert ou des régions montagneuses, dans l'ordre suivant : 1. noir et blanc, 2. rouge, 3. vert et jaune, 4. bleu, 5. marron, 6. mauve, rose, orange, gris et parfois un douzième terme qui diffère d'une langue à l'autre. (Les couleurs qui se réfèrent à des objets, telles que aubergine ou sépia, ou les couleurs qui ne sont pas applicables de manière générale, telles que blond, sont exclues de cette discussion.) Cette découverte précise est la suivante : si une langue particulière possède un mot pour désigner n'importe laquelle de ces couleurs, alors elle possède aussi un mot pour désigner toutes celles qui précèdent. Ce résultat implique également que les gens emploient ces catégories de couleurs élémentaires même si leur langue *ne* contient *pas* un mot pour chacune d'entre elles. Ces affirmations profondes ont été confirmées pour plus de cent langues.

Réf. 65

Jouons avec les arcs-en-ciel

La largeur courante de l'arc-en-ciel primaire est de 2,25°, pour l'arc-en-ciel secondaire elle est du double environ de cette valeur (ce qui explique pourquoi il est moins

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 62 Un arc blanc (en haut à gauche), un rare arc-en-ciel fendu irrégulier dans une situation venteuse (en haut à droite, montré avec une augmentation de la saturation en couleur), et un arc-en-ciel à six bras. (© Michel Tournay, Eva Seidenfaden et Terje Nordvik)

brillant). La largeur est plus importante que l'écart en angle de dispersion donné sur la Figure 59 parce que la taille angulaire du Soleil, environ 0,5°, doit (approximativement) être ajoutée en plus de la différence d'angle.

Si les gouttelettes sont très fines, l'arc-en-ciel devient blanc : il est alors appelé un *arc blanc*. De tels arcs sont fréquemment aperçus depuis les avions. Si les gouttelettes ne sont pas rondes, par exemple à cause d'un vent fort, nous pouvons obtenir ce que nous appelons un *arc-en-ciel irrégulier* ou *apparié*. Un exemplaire en est montré sur la Figure 62.

Défi 127 e

La lumière issue de l'arc-en-ciel est polarisée de façon tangentielle. Vous pouvez facilement le vérifier avec des lunettes de soleil polarisantes. Pendant la réflexion à l'intérieur des gouttelettes d'eau, puisque l'angle de réflexion est très proche de l'angle par lequel la réflexion totale se produit, la lumière devient polarisée. (Pourquoi cela conduit-il à la polarisation ?) Nous en dirons plus sur la polarisation dans la prochaine section.

Défi 128 pe

Si l'air est saturé en cristaux de glace au lieu de gouttelettes, la situation change radicalement, une nouvelle fois. Nous pouvons alors avoir des images supplémentaires du Soleil dans sa direction. Nous appelons chacune de ces images un *parhélie* (ou « faux soleil » ou « soleil double », ou « œil de bouc » dans l'Ouest canadien, ou encore « sundog » – chien du soleil – en anglais). Cela se produit de manière flagrante lorsqu'il n'y a pas de vent, si les cristaux sont tous orientés dans la même direction. Dans ce cas, nous pouvons prendre des photographies telles que celle de la Figure 63.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 63 Une photographie composite qui montre les parhélies, les colonnes lumineuses, le halo et l'arc tangent supérieur formés par les cristaux de glace dans l'air, s'ils sont tous orientés dans la même direction. (© Phil Appleton)

QUELLE EST LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ? – RÉTROSPECTIVE

La physique parle du mouvement. Nous pouvons converser grâce à un échange sonore, et le son est un exemple de signal. Un *signal (physique)* représente l'acheminement de l'information en utilisant le transport de l'énergie. Il n'y a aucun signal sans un mouvement énergétique. En réalité, il n'existe aucune méthode pour stocker de l'information sans emmagasiner de l'énergie. Nous pouvons donc attribuer à n'importe quel signal une vitesse de propagation. La vitesse de signal la plus élevée possible est également la vitesse maximale des actions générales à distance, ou, pour employer un langage plus approximatif, la vitesse maximale avec laquelle les effets émanent des causes.

Page ??

Si le signal est transporté par de la matière, comme un texte écrit dans une lettre, la vitesse du signal est alors égale à la vitesse du messager matériel, et les expériences montrent qu'elle est limitée par la vitesse de la lumière.

Pour un transport ondulatoire, tels les vagues sur l'eau, le son, la lumière ou les ondes radio, la situation est moins évidente. Quelle est la vitesse d'une onde ? La première réponse qui vient à l'esprit est la vitesse à laquelle les crêtes d'une onde sinusoïdale se déplacent. Cette *vitesse de phase*, que nous avons déjà introduite, est donnée par le rapport entre la fréquence et la longueur d'onde d'une onde monochromatique, c'est-à-dire par

$$v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k} \,. \tag{54}$$

Par exemple, la vitesse de phase détermine les phénomènes relatifs aux interférences. La lumière dans le vide possède la même vitesse de phase $v_{\text{ph}} = c$ pour toutes les fréquences. Êtes-vous capable d'imaginer une expérience permettant de tester cela avec une grande précision ?

Défi 129 s

D'autre part, il existe des situations où la vitesse de phase est plus importante que c, plus particulièrement lorsque la lumière voyage dans une substance absorbante et qu'au même moment sa fréquence est située près d'un maximum d'absorption. Dans ces cas, les expériences montrent que la vitesse de phase *n'est pas* identique à la vitesse du signal. Pour de telles situations, une meilleure approximation de cette vitesse de signal est représentée par la *vitesse de groupe*, c'est-à-dire la vitesse à laquelle voyagera le maximum des

Réf. 66

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

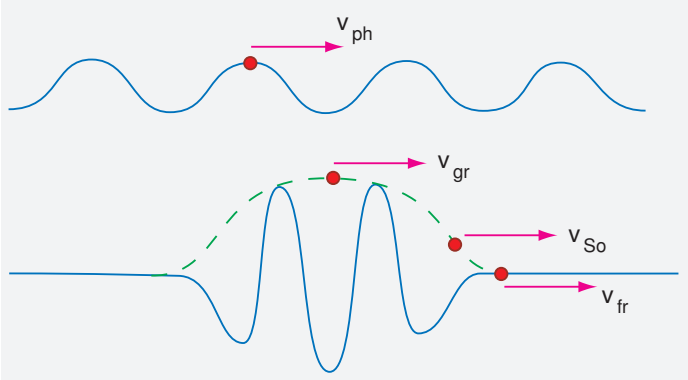


FIGURE 64 Définition des vitesses importantes dans les phénomènes ondulatoires.

groupes d'ondes. Cette vitesse est donnée par

$$v_{\mathrm{gr}} = \left.\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k}\right|_{k_0} , \tag{55}$$

où k_0 représente la longueur d'onde centrale du paquet d'ondes. Nous observons alors que $\omega = c(k)k = 2\pi v_{\mathrm{ph}}/\lambda$ implique la relation

$$v_{\mathrm{gr}} = \left.\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k}\right|_{k_0} = v_{\mathrm{ph}} - \lambda\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{ph}}}{\mathrm{d}\lambda} . \tag{56}$$

Cela signifie que le signe du dernier terme détermine si la vitesse de groupe est plus grande ou plus petite que la vitesse de phase. Pour un groupe d'ondes qui avance, comme indiqué par les lignes en pointillé de la Figure 64, cela corrobore le fait que des nouveaux maxima surgissent soit à la fin, soit à l'avant du groupe. Les expériences révèlent que cela n'est valable que pour de la lumière *traversant la matière*. Pour la lumière *dans le vide*, la vitesse de groupe possède la valeur identique $v_{\mathrm{gr}} = c$ pour toutes les valeurs du vecteur d'onde k.

Vous devez être avertis que de nombreuses publications diffusent toujours l'affirmation incorrecte que la vitesse de groupe *dans un matériau* n'est jamais supérieure à c, la vitesse de la lumière dans le vide. En réalité, la vitesse de groupe dans la matière peut
Défi 130 pe être nulle, infinie, voire négative, ce qui se produit lorsque l'impulsion lumineuse est extrêmement courte, c'est-à-dire lorsqu'elle incorpore une grande variété de fréquences, ou encore lorsque la fréquence est proche d'une transition d'absorption. Dans de nombreuses situations (mais pas toutes), on remarque que le groupe d'ondes s'élargit substantiellement ou même se divise, ce qui rend ardu le fait de définir précisément le maximum du groupe et ainsi sa vitesse. Un grand nombre d'expériences ont confirmé ces prédictions. Par exemple, la vitesse de groupe dans certains matériaux a été mesurée comme
Réf. 67 étant égale à *dix fois* celle de la lumière. L'indice de réfraction est alors plus petit que 1. Néanmoins, dans toutes ces occasions, la vitesse de groupe *n'est pas* identique à la vitesse de signal*.

* En mécanique quantique, Schrödinger démontra que la vitesse d'un électron est donnée par la vitesse de

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Quelle est alors la meilleure vitesse qui décrit la propagation du signal ? Le physicien allemand Arnold Sommerfeld* résolut presque entièrement ce problème majeur au début du vingtième siècle. Il définit la vitesse de signal comme étant la vitesse v_{So} de la pente frontale de l'impulsion, comme indiqué sur la Figure 64. La définition ne peut pas être synthétisée dans une formule, mais elle doit avoir la propriété de bien décrire la propagation du signal pour pratiquement toutes les expériences, en particulier celles dans lesquelles les vitesses de groupe et de phase sont plus grandes que la vitesse de la lumière. En étudiant ses propriétés, nous avons constaté qu'il n'existe aucun matériau pour lequel la vitesse de signal de Sommerfeld est plus grande que la vitesse de la lumière dans le vide.

Réf. 66

Parfois, il est conceptuellement plus facile de décrire la propagation du signal à l'aide de la vitesse de l'énergie. Comme nous l'avons mentionné auparavant, chaque signal transporte de l'énergie. La *vitesse de l'énergie* v_{en} est définie comme étant le rapport entre la densité du flux de puissance $\boldsymbol{P}$, c'est-à-dire le vecteur de Poynting, et la densité d'énergie W, considérées toutes les deux dans la direction de propagation. Pour des champs électromagnétiques – les seuls suffisamment rapides pour être intéressants pour d'éventuels signaux supraluminiques – ce rapport est

$$\boldsymbol{v}_{en} = \frac{\mathrm{Re}(\boldsymbol{P})}{W} = \frac{2c^2\, \boldsymbol{E} \wedge \boldsymbol{B}}{\boldsymbol{E}^2 + c^2 \boldsymbol{B}^2} \,. \tag{57}$$

Cependant, comme dans le cas de la vitesse frontale, pour la vitesse de l'énergie nous devons préciser si nous sous-entendons que l'énergie est transportée par l'impulsion principale ou par le front de celle-ci. Dans le vide, absolument rien n'est plus grand que la vitesse de la lumière**. (En général, la vitesse de l'énergie dans la matière possède une valeur légèrement différente de la vitesse de signal de Sommerfeld.)

Réf. 66

Au cours de ces dernières années, les progrès dans la technologie des détecteurs de lumière, qui nous permettent de débusquer même les énergies les plus ténues, ont obligé les scientifiques à considérer les plus rapides de toutes ces vitesses énergétiques pour décrire la vitesse de signal. En tirant profit des détecteurs ayant la sensibilité la plus élevée possible, nous pouvons utiliser comme signal le premier point du train d'ondes dont l'amplitude est différente de zéro, c'est-à-dire la première quantité minuscule d'énergie qui s'approche. La vitesse de ce point, conceptuellement similaire à la vitesse de signal de Sommerfeld, est communément appelée la *vitesse de front* ou, pour la distinguer encore plus nettement de la situation de Sommerfeld, la *vitesse précurseur*. Elle est simplement

groupe de sa fonction d'onde. Par conséquent, la même discussion resurgit en théorie quantique, comme nous le découvrirons dans la prochaine partie de notre ascension montagneuse.

* Arnold Sommerfeld (n. Königsberg 1868, d. Munich 1951) joua un rôle central dans l'extension de la relativité restreinte et générale, de la théorie quantique, et de leurs applications. Professeur à Munich, excellent enseignant et auteur d'ouvrages, il travailla sur la théorie atomique, sur la théorie des métaux et sur l'électrodynamique. Il fut le premier à saisir l'importance et le mystère régnant autour de la « célèbre constante de structure fine de Sommerfeld ».

** Les signaux ne transportent pas seulement de l'énergie, ils emportent également une entropie négative (l'« information »). L'entropie d'un émetteur s'accroît pendant la transmission. Le récepteur voit son entropie diminuer (mais moins que l'augmentation de l'émetteur, bien évidemment).

Réf. 68

Remarquez que la vitesse de groupe négative implique un transport d'énergie qui va à l'encontre de la vitesse de propagation de la lumière, ce qui est possible uniquement dans les matériaux *chargés en énergie*.

Réf. 69

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

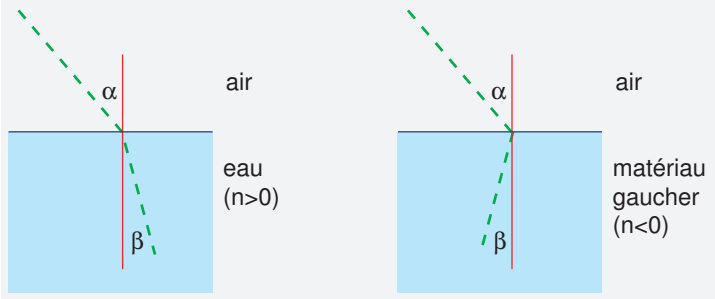


FIGURE 65 Indices de réfraction positif et négatif.

Défi 131 s donnée par

$$v_{\text{fr}} = \lim_{\omega \to \infty} \frac{\omega}{k} \,. \tag{58}$$

La vitesse précurseur n'est *jamais* plus grande que la vitesse de la lumière dans un espace vide, de même que dans la matière. En fait, elle est précisément égale à c parce que, pour des fréquences extrêmement élevées, le rapport ω/k est indépendant du matériau, et les propriétés relatives au vide l'emportent. La vitesse précurseur est la véritable vitesse de signal ou la *véritable vitesse de la lumière*. En l'utilisant, toutes les discussions sur la vitesse de la lumière deviennent claires et univoques.

Pour achever cette section, voici deux défis pour vous. Laquelle de toutes les vitesses
Défi 132 s de la lumière est-elle mesurée dans les expériences qui déterminent celle-ci, par exemple quand la lumière est envoyée sur la Lune et réfléchie vers l'expéditeur ? Et maintenant un autre plus difficile : pourquoi la vitesse de signal de la lumière est-elle plus faible à
Défi 133 s l'intérieur de la matière, comme le montrent toutes les expériences ?

200 ANS TROP TARD – INDICES DE RÉFRACTION NÉGATIFS

En 1968, le physicien soviétique Victor Veselago fit une étrange prédiction : l'indice de réfraction pourrait avoir des valeurs *négatives* sans invalider une quelconque loi connue de la physique. Un indice négatif signifie qu'un rayon est réfracté du même côté que le rayon incident, comme indiqué sur la Figure 65. Par conséquent, des lentilles concaves faites avec ces matériaux focalisent les rayons parallèles et les lentilles convexes les font diverger, contrairement aux matériaux communs utilisés pour les lentilles.

En 1996, John Pendry et son équipe ont proposé des moyens de réaliser de tels matériaux. En 2000, une première confirmation expérimentale pour la réfraction micro-onde
Réf. 70 fut publiée, mais elle rencontra un fort scepticisme. En 2002, le débat battait son plein. On a argumenté que des indices de réfraction négatifs entraînent l'existence de vitesses supérieures à celle de la lumière et qu'ils ne sont possibles que pour une vitesse de phase ou une vitesse de groupe, mais pas pour la véritable vitesse de signal ou de l'énergie. Les problèmes conceptuels surgiraient uniquement parce, que dans certains systèmes physiques, les angles de réfraction pour le mouvement de la phase et pour le mouvement de l'énergie seraient différents.

Entre-temps, des indices de réfraction négatifs ont été réellement observés à plusieurs
Réf. 71 reprises, les systèmes associés ayant été intensivement étudiés partout dans le monde. Les

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

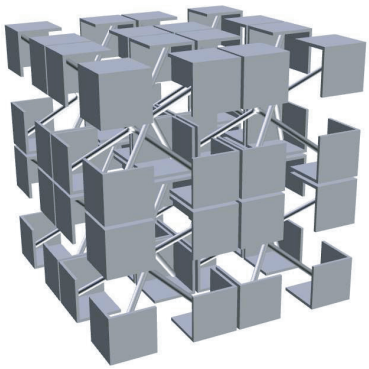


FIGURE 66 Un exemple de métamatériau isotrope. (M. Zedler *et al.*, © 2007 IEEE)

systèmes dotés d'un indice de réfraction négatif existent réellement. Les matériaux exhibant cette propriété sont qualifiés de *gauchers*. La raison est que les vecteurs du champ électrique, du champ magnétique et le vecteur d'onde forment un triplet gaucher, au contraire du vide et de la plupart des matériaux courants, où le triplet est droitier. De tels matériaux possèdent en toute logique une perméabilité magnétique *négative* et un
Réf. 72 coefficient diélectrique (permittivité) *négatif*.

Mis à part ces propriétés de réfraction inhabituelles, les matériaux gauchers ont des vitesses de phase négatives, c'est-à-dire une vitesse de phase opposée à la vitesse de l'énergie. Ils révèlent aussi des effets Doppler inversés et produisent des angles obtus dans l'effet Vavilov–Çerenkov (en émettant un rayonnement Vavilov–Çerenkov vers l'arrière au lieu de la direction avant).

Mais, de façon plus intrigante, on prévoit que les matériaux à réfraction négative permettent de concevoir des lentilles qui sont parfaitement plates. De surcroît, au cours de
Réf. 73 l'année 2000, John Pendry attira l'attention de toute la communauté mondiale des physiciens en prédisant que les lentilles faites avec ces matériaux, en particulier pour $n = -1$, seraient *parfaites*, surpassant ainsi la limite classique de la diffraction. Cela se produirait parce qu'une telle lentille reproduit également les parties évanescentes des ondes, en les amplifiant de manière appropriée. Les premières expériences semblent confirmer cette
Réf. 72 prédiction. Ce sujet reste encore largement débattu.

Défi 134 pe Pouvez-vous expliquer comment la réfraction négative se démarque de la diffraction ?

Métamatériaux

La réalisation la plus simple de systèmes gauchers est représentée par les métamatériaux. Les *métamatériaux* (gauchers) sont des structures conçues en métal isolant qui sont gauchères pour une certaine étendue de longueurs d'onde, généralement dans le domaine radio ou micro-onde.

Actuellement, il existe deux approches fondamentales pour réaliser des métamaté-
Réf. 74 riaux. La première consiste à construire un métamatériau à partir d'une vaste matrice de circuits (LC) résonants contenant une bobine et un condensateur. La deuxième approche
Réf. 75 consiste à les produire à partir de lignes de transmission résonantes. Cette dernière approche possède un meilleur rendement et une étendue spectrale plus large. Un exemple en est indiqué sur la Figure 66.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La plupart des métamatériaux sont conçus pour le domaine micro-onde. On a récemment identifié des cristaux qui agissent comme des matériaux gauchers dans le domaine optique, bien que ce soit pour certaines fréquences seulement, et dans une seule dimension uniquement.

La recherche sur ce sujet est actuellement en pleine effervescence. Les applications industrielles des (méta-)matériaux gauchers sont attendues pour la conception des antennes : par exemple, le dipôle de l'antenne pourrait être situé juste au-dessus d'un métamatériau, permettant des antennes directionnelles plates. Les gens les plus irréalistes sont ceux qui affirment que des *manteaux d'invisibilité* peuvent être réalisés à l'aide de métamatériaux. Bien que cela constitue un excellent slogan marketing pour attirer des fonds, ce n'est pas réaliste à cause des pertes inévitables de signaux dans les matériaux, de la dispersion, de la taille finie des cellules, etc. Jusqu'ici, tous les avions qu'on a prétendu être invisibles pour certaines fréquences (radar) se sont révélés finalement être visibles. Mais les sources des financements militaires sont connues pour entretenir une relation distante avec la réalité.

Signaux et prédictions

Lorsqu'une personne lit un texte par téléphone à un voisin qui l'écoute et, éventuellement, le répète, nous parlons de communication. Pour toute tierce personne, la vitesse de la communication est toujours inférieure à la vitesse de la lumière. Mais si le voisin connaît déjà le texte, il peut le réciter sans avoir entendu la voix du lecteur. Pour le troisième observateur, une telle situation semble impliquer l'existence d'un mouvement qui est plus rapide que la lumière. La prédiction peut ainsi *imiter* la communication et, en particulier, elle peut imiter la communication plus rapide que la lumière (supraluminique). Une telle situation fut démontrée de la façon la plus spectaculaire en 1994 par Günter Réf. 76 Nimtz, qui transportait apparemment de la musique – toute musique est prévisible sur des échelles de temps courtes – par le truchement d'un système « plus rapide que la lumière ». Pour faire la distinction entre les deux situations, nous remarquons que, dans le cas de la prédiction, aucun transport d'énergie n'a lieu, contrairement au cas de la communication. Autrement dit, la définition d'un signal comme étant un messager de l'information n'est plus aussi fonctionnelle et précise que la définition du signal comme *transporteur d'énergie*. Dans l'expérience mentionnée ci-dessus, aucune énergie n'était transportée plus vite que la lumière. La même distinction entre la prédiction, d'une part, et la propagation du signal ou de l'énergie, d'autre part, sera utilisée plus tard pour éclair-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 13 Propriétés expérimentales du vide (plat) et de l'« éther ».

PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	VALEUR EXPÉRIMENTALE
perméabilité	$\mu_0 = 1{,}3\,\mu H/m$
permittivité	$\varepsilon_0 = 8{,}9\,pF/m$
impédance/résistance d'onde	$Z_0 = 376{,}7\,\Omega$
invariance conforme	s'applique
dimensionnalité spatiale	3
topologie	R^3
contenu en masse et énergie	non décelable
frottement sur des corps mobiles	non décelable
mouvement par rapport à l'espace-temps	non décelable

cir certaines expériences célèbres en mécanique quantique.

> Si l'allure à laquelle les articles de physique sont publiés continue d'augmenter, les revues de physique rempliront bientôt les étagères des bibliothèques plus vite que la vitesse de la lumière. Cela ne violera pas la relativité puisque aucune information pertinente ne sera transmise.
>
> David Mermin

L'ÉTHER EXISTE-T-IL ?

Les rayons gamma, la lumière et les ondes radio sont des ondes électromagnétiques en mouvement. Ils existent tous dans l'espace vide. Qu'est-ce qui oscille lorsque la lumière voyage ? Maxwell appela lui-même *éther* le « milieu » dans lequel cela se produit. Les propriétés de l'éther mesurées dans les expériences sont listées dans le Tableau 13.

Bien sûr, les valeurs de la perméabilité et de la permittivité du vide sont liées à la définition des unités henry et farad. Le dernier élément du tableau est le plus important : malgré des efforts considérables, personne n'a été capable de détecter un quelconque *mouvement* de l'éther. Autrement dit, bien que l'on suppose que l'éther oscille, il ne se déplace pas. Avec les autres données, tous ces résultats peuvent être résumés en une seule phrase : il n'existe aucune manière de distinguer l'éther du vide : ils représentent une seule et même entité.

Page 301
Réf. 77
Défi 135 s

Parfois, nous entendons dire que certaines expériences, ou même que la théorie de la relativité, montrent que l'éther n'existe pas. Cela n'est pas strictement vrai. En fait, les expériences montrent quelque chose de plus important. Tous les relevés indiquent que l'éther est indiscernable du vide. Effectivement, si nous utilisons la variation de la courbure comme représentant la définition du mouvement pour le vide, le vide *peut* bouger, comme nous l'avons découvert dans la section sur la relativité générale, mais l'éther demeure toujours impossible à dissocier de celui-ci*.

Réf. 78

* En réalité, le mot « éther » a été employé comme une expression décrivant plusieurs idées différentes, en fonction de leurs auteurs. En premier lieu, il fut utilisé pour représenter l'idée qu'un vide n'est pas vide, mais *plein* ; deuxièmement, que cette plénitude peut être décrite par des *modèles mécaniques*, tels que des

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Plus tard, nous découvrirons même que l'aptitude du vide à permettre la propagation de la lumière et sa capacité à permettre la propagation des particules sont équivalentes : les deux requièrent les mêmes propriétés. Par conséquent, l'éther demeurera *indiscernable* du vide pour le reste de notre promenade. Autrement dit, l'éther est un concept superflu et nous l'omettrons dorénavant dans notre excursion. En dépit de ce résultat, nous n'avons pas encore achevé l'étude du vide, qui nous occupera encore longtemps, à commencer par le chapitre qui suit. Qui plus est, un bon nombre des aspects mentionnés dans le Tableau 13 nécessiteront quelques corrections par la suite.

Réf. 78

Curiosités et défis amusants concernant la lumière

Puisque la lumière est une onde, quelque chose doit se produire si elle est dirigée vers un trou de diamètre plus petit que sa longueur d'onde. Qu'est-ce qui se passe exactement ?

Défi 136 s

* *

L'électrodynamique montre que les faisceaux lumineux poussent toujours, ils ne tirent jamais. Pouvez-vous confirmer que les « rayons à traction » sont impossibles dans la nature ?

Défi 137 e

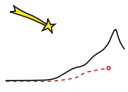
* *

Il est notoire que le matériau brillant situé dans les ampoules électriques est un fil de tungstène plongé dans un gaz inerte. Ce fut le résultat d'une série d'expériences qui commencèrent avec le grand-père de toutes les ampoules, à savoir le cornichon. Les générations anciennes savent qu'un cornichon, lorsqu'il est relié au réseau électrique à 230 V, brille avec une lueur verte éclatante. (Soyez prudents, l'expérience est salissante et quelque peu dangereuse.)

* *

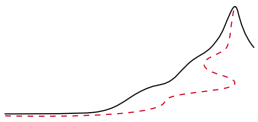
Si la lumière émise par les phares des voitures était polarisée du bas à gauche vers le haut à droite (vue du siège du conducteur), nous pourrions considérablement améliorer la qualité de la conduite nocturne : nous pourrions ajouter un polariseur au pare-brise, orienté dans la même direction. Ainsi, un conducteur verrait la réflexion de sa propre lumière, mais la lumière provenant des véhicules en sens inverse serait significativement atténuée. Pourquoi cela n'est-il pas mis en place dans les véhicules modernes ?

Défi 138 pe



rouages, des petites sphères, des tourbillons, etc. ; troisièmement, on a imaginé qu'un vide est *similaire à la matière*, qu'il est constitué du même substrat. De manière intéressante, certains de ces problèmes resurgiront dans la dernière partie de notre ascension montagneuse.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 4

LES IMAGES ET L'ŒIL – L'OPTIQUE

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Comment démontrer que vous êtes sacré

La réflexion de la lumière et la réfraction sont responsables de nombreux effets. Le symbole à l'origine indien de la sainteté, maintenant employé à travers la majeure partie du monde, est l'*auréole*, également appelée *halo* ou *Heiligenschein* (mot allemand signifiant « auréole » [N.D.T.]), un anneau de lumière surplombant la tête. Vous pouvez facilement l'observer autour de votre propre tête. Vous avez juste besoin de vous lever tôt le matin et de regarder l'herbe humide tout en tournant votre dos au Soleil. Vous verrez une auréole autour de votre ombre. Cet effet est dû à la rosée du matin située sur l'herbe, qui réfléchit la lumière vers l'arrière principalement dans la direction de la source lumineuse, comme esquissé sur la Figure 67. Le jeu amusant est que si vous le faites en groupe, vous verrez l'auréole autour de *votre* tête seulement.

Réf. 79

La peinture rétro-réfléchissante fonctionne de la même manière : elle contient de minuscules billes de verre qui jouent le rôle de la rosée. Une large surface de peinture rétro-réfléchissante, un panneau de signalisation par exemple, peut également révéler votre auréole si la source de lumière est suffisamment éloignée. La « lueur » bien connue des yeux d'un chat la nuit est également due au même effet, elle est visible uniquement si vous regardez le chat avec une source de lumière située derrière vous. Par ailleurs, les catadioptres (« Cat's-eyes » en anglais, ou « yeux de chat » [N.D.T.]) fonctionnent-ils comme les yeux d'un chat ?

Réf. 80

Défi 139 s

Voyons-nous ce qui existe ?

Nous voyons parfois *moins* de choses qu'il n'y en a. Fermez votre œil gauche, observez le point blanc dans la Figure 68, rapprochez lentement la page de votre œil, et faites attention à la ligne du milieu. À une distance d'environ 15 à 20 cm, cette ligne médiane paraîtra ininterrompue. Pourquoi ?

Défi 140 s

D'un autre côté, nous voyons parfois *plus* de choses qu'il n'y en a vraiment, comme les figures 69 et 70 l'indiquent. La première montre que des lignes parallèles peuvent paraître obliques, et la seconde montre ce que nous appelons une *grille de Hermann*, baptisée d'après son découvreur*. La grille de Hermann de la Figure 70, révélée par Elke Lingelbach en 1995, est particulièrement saisissante. Des variantes de ces grilles sont dorénavant employées pour comprendre les mécanismes qui fondent la vision humaine. Par exemple, elles peuvent être utilisées pour déterminer combien de cellules sensibles

Réf. 81

* Ludimar Hermann (1838–1914) était un physiologiste suisse. Ses grilles sont souvent dénommées à tort « grilles de Hering » d'après celui qui rendit la découverte de Hermann célèbre.

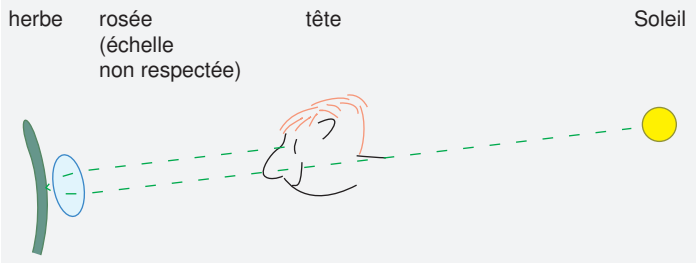


FIGURE 67 La trajectoire de la lumière pour la rosée sur l'herbe est responsable de l'auréole.

FIGURE 68 Une limitation de l'œil.

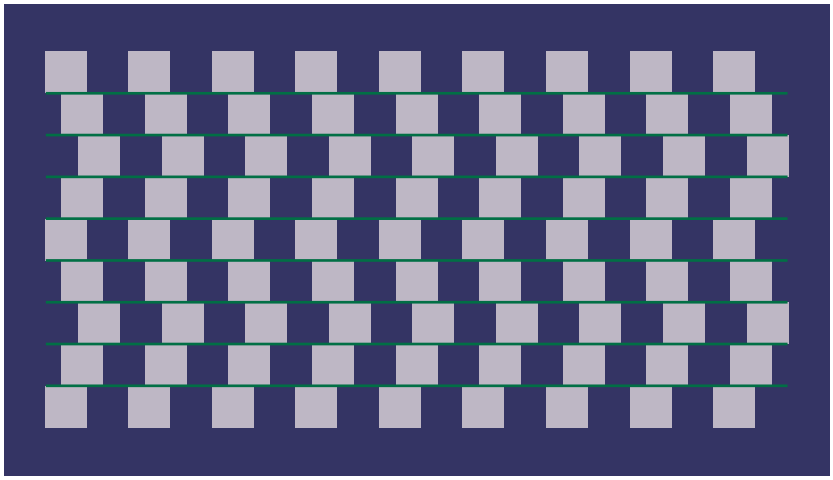


FIGURE 69 Quel est l'angle entre les lignes vertes adjacentes ?

à la lumière, dans la rétine, sont associées à une voie de transmission vers le cerveau. Les illusions sont dépendantes de l'angle parce que ce nombre est également variable en fonction de l'angle.

Nos yeux « voient » aussi des choses *différemment* : la rétine capte une image *inversée*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

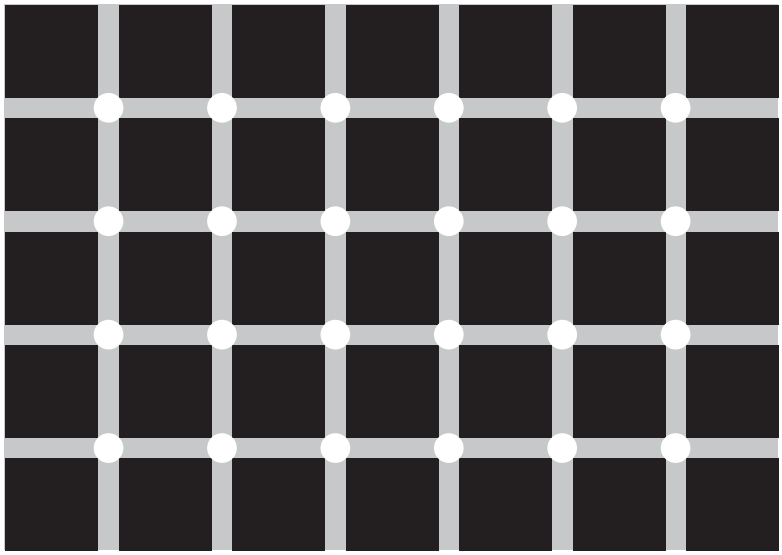


FIGURE 70 La grille de Lingelbach : voyez-vous des points blancs, gris ou noirs ?

du monde. Il existe une méthode élémentaire, due à Helmholtz, pour le montrer*. Vous avez juste besoin d'une aiguille et d'un morceau de papier, par exemple cette page de texte. Utilisez l'aiguille pour faire deux trous à l'intérieur de deux lettres « oo ». Laissez alors la page aussi près que possible de votre œil, regardez à travers les deux trous en direction du mur, en maintenant l'aiguille verticalement, quelques centimètres derrière la feuille. Vous verrez deux images de l'aiguille. Si vous recouvrez maintenant le trou de *gauche* avec votre doigt, l'aiguille de *droite* disparaîtra, et vice versa. Cette expérience montre que l'image située dans l'œil, sur la rétine, est inversée. Pouvez-vous parachever cette démonstration ?

Défi 141 pe

Deux autres expériences permettent de produire le même résultat. Si vous appuyez très légèrement *vers l'intérieur* de votre œil (faites attention !), vous verrez un point sombre apparaître *à l'extérieur* de votre champ de vision. Et si vous vous tenez dans une pièce obscure et que vous demandez à un ami de fixer une bougie allumée, scrutez son œil : vous verrez trois images réfléchies : deux à l'endroit, réfléchies par la cornée et le cristallin, et une troisième estompée, *à l'envers*, réfléchie par la rétine.

Une autre raison qui nous explique pourquoi nous ne percevons pas l'image complète de la nature est que nos yeux possèdent une sensibilité limitée. Cette sensibilité culmine à environ 560 nm. En dehors de l'étendue délimitée par le rouge et le violet, l'œil ne détecte pas de rayonnement. Nous apercevons donc une partie seulement de la nature.

* Lisez HERMANN VON HELMHOLTZ, *Handbuch der physiologischen Optik*, 1867. Ce célèbre classique est disponible en anglais sous le titre *Handbook of Physiological Optics*, Dover, 1962. Ce physicien, médecin et politicien prussien né sous le nom de Hermann Helmholtz (n. Potsdam 1821, d. Charlottenburg 1894) fut célèbre pour ses travaux sur l'optique, l'acoustique, l'électrodynamique, la thermodynamique, l'épistémologie et la géométrie. Il fonda plusieurs instituts de physique à travers l'Allemagne. Il fut l'un des premiers à avoir diffusé l'idée de la conservation de l'énergie. Son autre ouvrage majeur, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, publié en 1863, pose les bases de l'acoustique et, en tant que manuel de référence, mérite toujours d'être lu.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 71 Un exemple de photographie infrarouge, délicatement mixée avec une image colorée. (© Serge Augustin)

FIGURE 72 Comment l'aspect d'un tournesol change avec la longueur d'onde : comment il apparaît à l'œil humain, à quoi il devrait ressembler pour un oiseau, et comment il apparaît dans l'ultraviolet. (© Andrew Davidhazy)

Par exemple, des photographies infrarouges de la nature, telle celle représentée sur la Figure 71, sont intéressantes parce qu'elles nous montrent quelque chose de différent de ce que nous percevons habituellement.

Chaque spécialiste du mouvement devrait également savoir que la sensibilité de l'œil *ne* correspond *pas* à la partie la plus brillante de la lumière du soleil. Ce mythe a été diffusé tout autour du monde par un grand nombre de manuels qui ont été copiés les uns à partir des autres. Selon que nous utilisons la fréquence, la longueur d'onde ou le logarithme de la longueur d'onde, le spectre solaire culmine respectivement à 500 nm, 880 nm ou 720 nm. La sensibilité spectrale de l'œil humain, de même que la sensibilité complètement différente des oiseaux ou des grenouilles, est déterminée par les composés chimiques employés pour la détection. En bref, l'œil humain ne peut être appréhendé que par une analyse minutieuse de l'histoire de son évolution particulière.

Réf. 82

Une rumeur, répandue par de nombreux médecins et sages-femmes à ce jour, précise

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

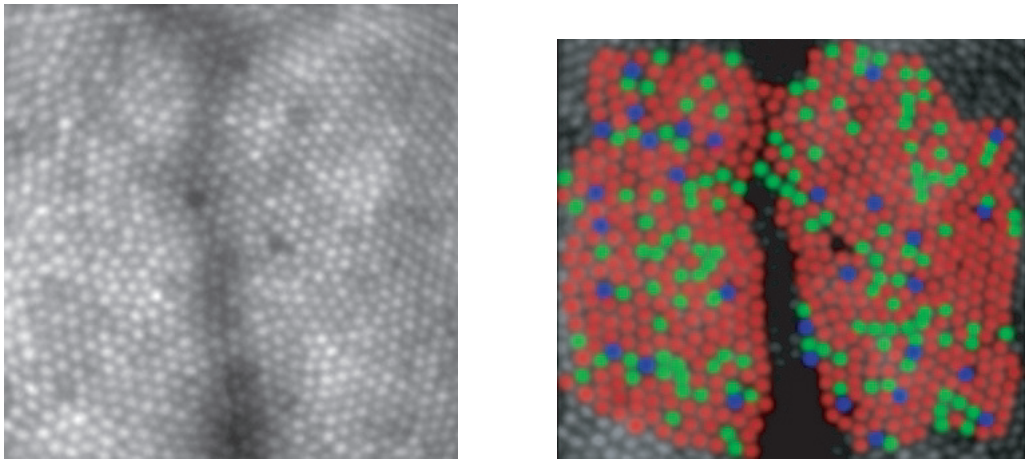


FIGURE 73 Une photographie en haute résolution d'une rétine humaine en vie, comprenant une indication mesurée (en fausses couleurs) de la sensibilité de chaque cône. (© Austin Roorda)

que les nouveau-nés voient tout à l'envers. Pouvez-vous expliquer pourquoi cette affir-
Défi 142 s mation est fausse ?

En résumé, nous devons être prudents lorsque nous soutenons que voir signifie obser-ver. Des exemples tels que ceux que nous venons de mentionner nous amènent à nous demander s'il existe d'autres limitations de nos facultés sensorielles qui seraient moins flagrantes. Et notre promenade en révélera en réalité plusieurs.

COMMENT PRODUISONS-NOUS DES IMAGES DE L'INTÉRIEUR DE L'ŒIL ?

Les représentations les plus saisissantes réalisées jusqu'à présent concernant une ré-tine humaine *vivante*, telle celle de la Figure 73, furent effectuées par le groupe de David
Réf. 83 Williams et Austin Roorda de l'université de Rochester dans l'État de New York. Ils utilisèrent l'optique adaptative, une technique qui modifie la forme des lentilles qui pro-duisent les images afin de compenser la variation de forme du cristallin de l'œil humain*.

Les yeux perçoivent les couleurs en moyennant l'intensité parvenant aux cônes sen-
Page 97 sibles au rouge, au bleu et au vert. Cela explique la possibilité, mentionnée plus haut, de percevoir la même impression de couleur, par exemple du jaune, soit par le biais d'un rayon laser de jaune pur, soit par un mélange convenable de lumière rouge et verte.

Mais si la lumière est focalisée sur un cône seulement, l'œil fait des confusions. Si, en utilisant cette optique adaptative, un rayon laser rouge est focalisé de telle façon qu'il frappe un cône vert seulement, une chose étrange se produit : bien que la lumière soit *rouge*, l'œil voit une couleur *verte* !

Par ailleurs, la Figure 73 est plutôt déconcertante. Dans l'œil humain, les vaisseaux sanguins sont situés *devant* les cônes. Pourquoi n'apparaissent-ils pas dans l'image ? Et
Défi 143 s pourquoi ne nous perturbent-ils pas dans la vie quotidienne ? (La figure ne montre pas

* La nature utilise une autre astuce pour obtenir la résolution maximale : l'œil exécute continuellement des petits mouvements, appelés *micronystagmus*. Il oscille sans cesse autour de la direction de la vision à une fréquence d'environ 40 à 50 Hz. De surcroît, ce mouvement est également mis à profit pour permettre aux cellules de la rétine de se recharger.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

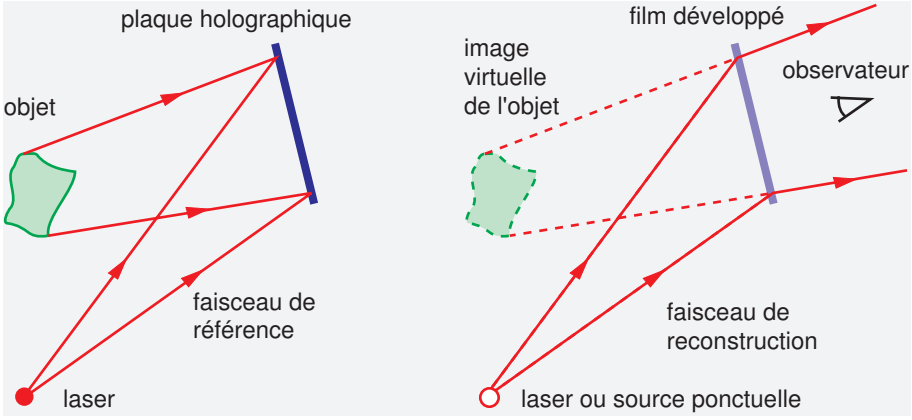


FIGURE 74 L'enregistrement et l'observation d'un hologramme.

l'autre type de cellules sensibles à la lumière, les *bâtonnets*, parce que le sujet était plongé dans la lumière ambiante. Les bâtonnets ne font surface sur la rétine que dans l'obscurité, et ils produisent alors des images en noir et blanc.)

De tous les mammifères, seuls les primates peuvent percevoir les *couleurs*. Les taureaux, par exemple, ne le peuvent pas ; ils ne peuvent pas distinguer le rouge du bleu. Par ailleurs, les meilleurs percepteurs des couleurs parmi tous sont les oiseaux. Ils possèdent des récepteurs coniques pour le rouge, le bleu, le vert, l'UV et, selon le volatile, pour jusqu'à trois ensembles supplémentaires de couleurs. Un certain nombre d'oiseaux (mais ils ne sont pas nombreux) possèdent également une meilleure résolution oculaire que les humains. Plusieurs volatiles ont aussi une résolution temporelle plus élevée : les hommes perçoivent un mouvement continu lorsque les images se déroulent à une vitesse allant de 30 à 70 Hz (selon le contenu du film), certains insectes peuvent distinguer des images jusqu'à 300 Hz.

Comment réalisons-nous des hologrammes et autres images tridimensionnelles ?

Notre sens de la vue nous donne l'impression de profondeur principalement à cause de trois effets. Premièrement, les deux yeux perçoivent des images différentes. Deuxièmement, les images formées dans les yeux dépendent de la position. Troisièmement, notre œil a besoin de se focaliser différemment pour des distances différentes.

Une simple photographie ne reproduit aucun de ces trois effets. Une photographie correspond à l'image prise par un seul œil, à partir d'un emplacement particulier et pour une focalisation particulière. En fait, tous les appareils photo sont essentiellement des imitations d'un œil statique unique.

Défi 144 e

N'importe quel système cherchant à reproduire la perception de la profondeur doit inclure au moins l'un des trois effets mentionnés ci-dessus. Dans tous les systèmes existants, le troisième effet, le plus ténu, la variation du point focal avec la distance, n'est jamais utilisé parce qu'il est trop faible. Les systèmes de photographie stéréo et de réalité virtuelle utilisent intensivement le premier effet, en envoyant deux images distinctes aux yeux. Certaines cartes postales et écrans d'ordinateurs aussi sont recouverts par de minces lentilles cylindriques qui nous permettent d'envoyer deux images différentes aux

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

deux yeux, engendrant ainsi la même impression de perspective.

Mais évidemment, l'effet le plus spectaculaire est obtenu à chaque fois que des images qui dépendent de la position peuvent être engendrées. Certains systèmes de réalité virtuelle imitent cet effet en utilisant un capteur fixé sur la tête, et en créant des images générées par ordinateur qui varient selon cette position. Néanmoins, de tels systèmes ne sont pas capables de reproduire des situations réelles, et ainsi s'inclinent lorsqu'ils sont comparés à l'impression produite par des hologrammes.

Les hologrammes reproduisent tout ce qui est perçu à partir de n'importe quel point d'une région de l'espace. Un *hologramme* est donc un ensemble mémorisé d'images d'un objet dépendantes de la position. Il est produit en stockant l'amplitude *et la phase* de la lumière émise par cet objet. Pour y parvenir, l'objet est éclairé avec une source lumineuse *cohérente*, comme un laser, et le motif d'interférences est mémorisé. En éclairant le film photographique développé avec une source lumineuse cohérente, nous pouvons alors voir une image entièrement tridimensionnelle. En particulier, à cause de la reproduction de la position, l'image semble flotter librement dans l'espace. Les hologrammes furent développés en 1947 par le physicien hongrois Dennis Gabor (1900–1979), qui reçut le prix Nobel de physique en 1971 pour son travail.

Les hologrammes peuvent être mis en œuvre pour fonctionner en réflexion ou en transmission. Les hologrammes les plus simples utilisent une seule longueur d'onde. La plupart des hologrammes multicolores sont des hologrammes arc-en-ciel, qui exhibent des fausses couleurs sans rapport avec les objets d'origine. Les véritables hologrammes multicolores, constitués de trois lasers différents, sont rares mais réalisables.

Est-il possible de réaliser des hologrammes *en mouvement* ? Oui, mais les dispositifs techniques demeurent toujours extrêmement coûteux. Pour l'instant, il n'en existe que dans quelques laboratoires seulement et ils coûtent des millions d'euros. Par ailleurs, pouvez-vous définir comment vous distingueriez un hologramme mobile d'un corps réel si jamais vous en rencontriez un par hasard, sans le toucher ? Défi 145 s

Imagerie optique

La production d'images constitue une activité importante de notre société moderne. La qualité des images dépend de l'usage intelligent qui est fait de l'optique, de l'électronique, de l'informatique et des sciences de la matière. En dépit d'une longue expérience dans ce domaine, il y a toujours de nouveaux résultats dans ce champ d'investigations. Les images, c'est-à-dire les reproductions bi ou tridimensionnelles, peuvent être prises par le biais d'au moins six groupes de techniques :

— La *photographie*, qui utilise une source lumineuse, des lentilles et une pellicule ou un autre détecteur de surface assez large. Elle peut être utilisée en réflexion, en transmission, avec une dépendance en phase, avec diverses intensités lumineuses, avec des détecteurs sensibles à diverses longueurs d'onde et de nombreuses autres façons.
— La *microscopie optique* utilise une source lumineuse, des lentilles et un film (ou un autre détecteur de surface assez large). Si l'illumination se produit à travers l'échantillon (c'est-à-dire que l'échantillon est éclairé par-dessous et observé par-dessus [N.D.T.]), en transmission, nous parlons de *microscopie en champ clair* (des variantes utilisent des filtres de couleurs ou polarisants). Si l'illumination est latérale, nous par-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

lons de *microscopie oblique*. Si l'illumination est confinée à un anneau extérieur de lumière, nous parlons de *microscopie en champ sombre*. Un système d'illumination encore plus élaboré, utilisant des ondes planes, permet la *microscopie à contraste de phase*. (Inventée par Frits Zernike dans les années 1930, elle lui permit de recevoir le prix Nobel de physique en 1953.) Si nous séparons un faisceau polarisé d'illumination en deux composantes qui traversent l'échantillon en des emplacements proches (mais pas identiques), puis que nous les recombinons par la suite, nous parlons de *microscopie à contraste d'interférence différentielle*. Si un échantillon est traité avec une teinture fluorescente, la lumière issue du faisceau éclairant est filtrée, et seule la fluorescence est observée, nous parlons de *microscopie à fluorescence*. La qualité des images des microscopes onéreux peut être encore améliorée à l'aide d'un ordinateur, par des techniques de déconvolution.

— L'*holographie*, qui emploie des lasers et des détecteurs de surface assez large, comme expliqué dans la section précédente. L'holographie permet de prendre des images tridimensionnelles des objets. Elle est généralement utilisée en réflexion, mais peut également être utilisée en transmission.

— Les *techniques de balayage* construisent des images point par point par le biais du mouvement du détecteur, de la source lumineuse ou des deux. Il existe également plusieurs techniques de microscopie à balayage : la *microscopie confocale à balayage laser*, la *microscopie en champ proche à balayage optique* basée sur l'utilisation de fibres, et des combinaisons de celles-ci avec les techniques de fluorescence ou diverses techniques de déconvolution. Nombre de ces techniques de microscopie à balayage permettent d'atteindre des résolutions beaucoup plus fines que la longueur d'onde de la lumière, ce qui est impossible avec la microscopie optique classique.

— La *tomographie*, généralement réalisée en transmission, utilise une source et une rangée de détecteurs qui tournent toutes les deux autour d'un objet. Cela permet de produire des images des coupes transversales des matériaux.

— La *télescopie* est utilisée principalement en géodésie et en astronomie. Les télescopes astronomiques les plus perfectionnés peuvent corriger les images stellaires des effets dus à la turbulence de l'atmosphère, ils peuvent aussi prendre des images à diverses longueurs d'onde, recouvrant les fréquences radio, infrarouge, visible, ultraviolette et les rayons X. Les télescopes à rayons X doivent être utilisés en dehors de l'atmosphère, pour éviter l'absorption de l'air, sur des fusées, des satellites ou des ballons atmosphériques, par exemple.

Dans toutes ces méthodes, la course est dans l'obtention d'images ayant la plus haute résolution possible. Les techniques de production d'images ayant une résolution *inférieure* à la longueur d'onde de la lumière ont connu un grand essor ces dernières années.

Une technique récente, appelée *microscopie à déplétion par émission stimulée* (STED), permet d'obtenir des largeurs de point de taille moléculaire. La limite conventionnelle sur la diffraction pour les microscopes est

$$d \geqslant \frac{\lambda}{2n \sin \alpha} , \tag{59}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

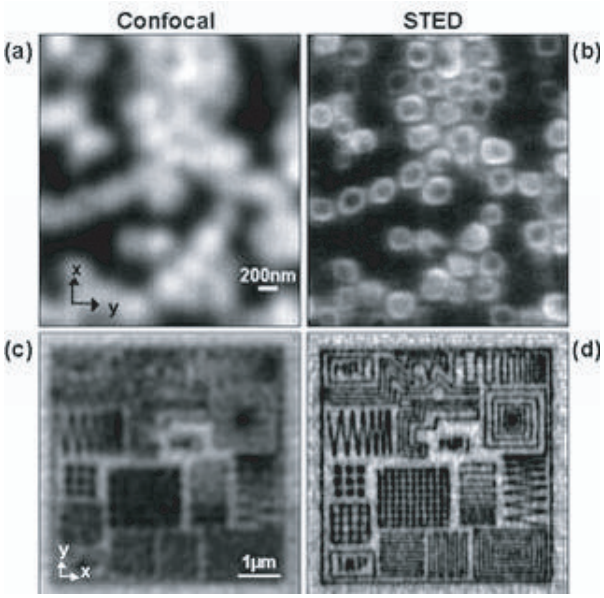


FIGURE 75 Microscopie optique sous-longueur d'onde utilisant la déplétion par émission stimulée (droite) comparée à la microscopie confocale conventionnelle (gauche). (© MPI für biophysikalische Chemie/Stefan Hell)

où λ est la longueur d'onde, n l'indice de réfraction et α représente l'angle d'observation. Cette nouvelle technique, un type particulier de microscopie à fluorescence développé par Stefan Hell, transforme cette expression en

$$d \geqslant \frac{\lambda}{2n \sin\alpha \sqrt{I/I_{\text{sat}}}}, \tag{60}$$

de telle sorte qu'une intensité de saturation convenablement choisie nous permet de réduire la limite sur la diffraction à des valeurs arbitrairement basses. Aujourd'hui, la microscopie optique avec une résolution de 16 nm a été réalisée, comme l'indique la Figure 75. Elle devrait, avec des techniques analogues, devenir banale dans un avenir proche.

Réf. 84

POURQUOI POUVONS-NOUS NOUS VOIR ?

Les physiciens font un usage bien curieux du terme « noir ». La plupart des corps à la température à laquelle ils sont chauffés au rouge, ou même encore plus chauds, constituent d'excellentes approximations de corps noirs. Par exemple, le tungstène des ampoules électriques à incandescence, à environ 2 000 K, émet un rayonnement de corps noir pratiquement pur. Toutefois, le verre absorbe dans ce cas une grande partie des composantes ultraviolette et infrarouge. Les corps noirs sont également utilisés pour définir la couleur *blanche*. Ce que nous appelons communément le blanc parfait correspond à la couleur émise par un corps noir de 6 500 K, à savoir le Soleil. Cette définition est employée à travers le monde entier, par exemple par la Commission internationale de l'éclairage. Des corps noirs plus ardents sont bleuâtres, des corps plus froids sont jaunes,

Réf. 136

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

orange ou rouges*. Les astres qui brillent dans le ciel sont catalogués de cette manière, comme résumé à la page 185.

Faisons un rapide tour d'horizon du rayonnement de corps noir. Celui-ci possède deux propriétés importantes : premièrement, la puissance lumineuse émise augmente avec la puissance quatrième de la température. Avec cette seule relation, vous pouvez vérifier la valeur de la température du Soleil, citée ci-dessus, simplement en comparant sa taille avec la largeur de votre pouce quand votre bras est tendu devant vous. Êtes-
Défi 146 d vous capable de le faire ? (Astuce : utilisez l'excellente approximation que la température
Réf. 137 moyenne terrestre, d'environ 14,0 °C, est due à l'exposition au Soleil.)

L'expression explicite pour la densité d'énergie émise u par fréquence ν peut être déduite de la loi du rayonnement pour les corps noirs, découverte par Max Planck**

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \,. \tag{61}$$

Il fit cette découverte majeure, que nous discuterons plus en détail dans la partie quantique de notre ascension montagneuse, simplement en comparant cette courbe avec l'expérience. Il apparaît que la nouvelle constante h, le *quantum d'action* ou la *constante de Planck*, possède la valeur de $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Js, et est cruciale pour toute la théorie quan-
Page ?? tique, comme nous le verrons. L'autre constante que Planck introduisit, la constante de Boltzmann k, apparaît comme un facteur préliminaire de la température dans toute la thermodynamique et agit comme une unité de conversion entre la température et l'énergie.

Défi 147 pe La loi du rayonnement donne, pour la densité d'énergie émise totale, l'expression

$$u(T) = T^4 \, \frac{8\pi^5 k^4}{15 c^3 h^3} \tag{62}$$

Défi 148 pe à partir de laquelle nous déduisons l'équation (70) en utilisant $I = uc/4$. (Pourquoi ?)

La deuxième propriété du rayonnement du corps noir concerne la valeur de la longueur d'onde de crête, c'est-à-dire la longueur d'onde émise avec l'intensité maximale.
Défi 149 pe Celle-ci détermine sa couleur, et on déduit de l'équation (61) qu'elle vaut

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,956\, k} \frac{1}{T} = \frac{2{,}90\,\text{mm K}}{T} \quad \text{mais} \quad \hbar \nu_{\max} = 2,82\, kT/h = (5{,}9 \cdot 10^{10}\,\text{Hz/K}) \cdot T \,. \tag{63}$$

* La majorité des corps ne sont pas noirs, parce que la couleur n'est pas seulement déterminée par l'émission, mais également par l'absorption de la lumière.

** Max Planck (1858–1947), professeur de physique à Berlin, fut une personnalité centrale en thermostatique. Il découvrit et baptisa la *constante de Boltzmann k* et le *quantum d'action h*, souvent dénommé constante de Planck. Son introduction de l'hypothèse quantique donna naissance à la théorie quantique. Il fit également connaître les travaux d'Einstein dans la communauté des physiciens, et plus tard lui trouva un emploi à Berlin. Il reçut le prix Nobel de physique en 1918. Importante figure dans les institutions scientifiques allemandes, il fut également l'une des très rares personnes qui eut le courage d'affronter Adolf Hitler *en face à face* et de lui signifier que l'idée d'incinérer les professeurs juifs était répugnante (il obtint un déchaînement de colère en guise de réponse). Très modeste, ayant connu de nombreuses tragédies dans sa vie personnelle, il était respecté par chaque personne qui le connaissait.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Chacune de ces expressions est dénommée *déplacement de couleur de Wien*, du nom de son inventeur*. La modification de la couleur avec la température est mise à profit dans les thermomètres optiques ; c'est également de cette manière que la température des astres est mesurée. Pour 37 °C, la température du corps humain, elle donne un pic de longueur d'onde à 9,3 µm ou 115 THz, qui est par conséquent la couleur de la partie principale du rayonnement émis par chaque être humain. (Le pic en longueur d'onde ne
Défi 150 s correspond pas au pic en fréquence. Pourquoi ?) D'autre part, d'après la législation sur les télécommunications de nombreux pays, tout émetteur de rayonnement doit détenir une licence pour pouvoir fonctionner ; il s'ensuit en toute rigueur qu'en France seules les personnes décédées sont légales, et uniquement si leur corps est à la température du zéro absolu !

Remarquez qu'un corps noir ou une étoile peut être bleu, blanc, jaune, orange ou
Défi 151 pe rouge. Il n'est jamais vert. Pouvez-vous expliquer pourquoi ?

Nous avons stipulé plus haut que n'importe quel matériau constitué de charges émet du rayonnement. Êtes-vous capable de découvrir un argument simple montrant que le
Défi 152 pe rayonnement thermique représente ou pas ce rayonnement, prédit de manière classique ?

Mais revenons à la question du titre de cette section. L'existence du rayonnement thermique implique que tout corps chaud se refroidira, même s'il est entreposé dans le milieu le plus isolant qui existe, à savoir le vide. Plus précisément, si le vide est entouré d'une paroi, la température d'un corps situé dans le vide s'approchera graduellement de celle de la paroi.

De manière intéressante, lorsque les températures de la paroi et du corps à l'intérieur sont devenues identiques, quelque chose d'étrange se produit. Cet effet est difficile à vérifier chez soi, mais des photographies impressionnantes peuvent être trouvées dans la
Réf. 138 littérature.

Une situation dans laquelle les parois et les objets situés à l'intérieur de celles-ci sont à la même température est celle du *four*. Il se révèle qu'il est *impossible* de voir des objets dans un four en utilisant la lumière provenant du rayonnement thermique. Par exemple, si un four et tout son contenu sont chauffés au rouge, prendre une photo de l'intérieur du four (sans flash !) ne révélera rien du tout. Il n'existe aucune variation de contraste ou de luminosité qui nous permette de distinguer les objets des parois ou de leur environ-
Défi 153 s nement. Pouvez-vous expliquer cette découverte ?

En bref, nous sommes capables de nous voir uniquement parce que les sources lumineuses que nous utilisons sont à des températures *différentes* de la nôtre. Nous pouvons nous voir seulement parce que nous *ne* vivons *pas* en équilibre thermique avec notre environnement.

La lumière comme arme ?

De nombreux pays affectent plus d'argent à l'étude de l'armement offensif qu'à l'accroissement du niveau d'éducation et de santé de leurs citoyens. Plusieurs types d'armes

* Wilhelm Wien (n. Fischhausen 1864, d. Munich 1928), physicien de Prusse orientale, reçut le prix Nobel de physique en 1911 pour la découverte de cette relation.

Remarquez que la valeur qui apparaît dans la règle de Wien peut seulement être calculée à partir de l'équation (61), mais ne peut pas être exprimée analytiquement. En réalité, la constante de Wien est solution de l'équation $x = 5(1 - e^{-x})$.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

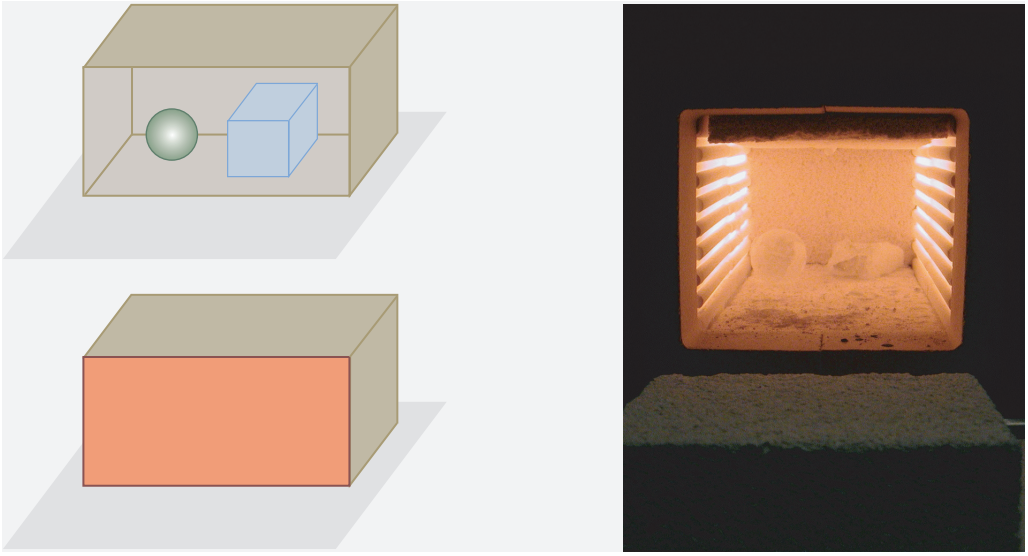


FIGURE 76 Des corps à l'intérieur d'un four à température ambiante n'ont pas la même couleur, contrairement aux corps à haute température. (© Wolfgang Rueckner)

d'assaut utilisant le rayonnement électromagnétique ont été étudiés. Deux d'entre eux sont particulièrement avancés.

La première arme est un camion doté d'une antenne parabolique orientable située sur son toit, d'une taille de 1 m environ, qui émet un faisceau micro-onde (95 GHz) de forte puissance (quelques kW). Celui-ci, comme tous les rayons micro-ondes, est invisible. En fonction de la puissance et de la forme du faisceau, il est douloureux voire meurtrier, jusqu'à une distance de 100 m. Ce dispositif terrible, avec lequel l'opérateur peut faire de très nombreuses victimes sans même se faire remarquer, était opérationnel en 2006. (Qui s'attend à ce qu'une antenne parabolique soit dangereuse ?) Des efforts pour l'interdire à travers le monde sont en train de gagner lentement du terrain.

La deuxième arme en cours de développement est dénommée *laser pulsé à impulsion mortelle*. L'idée consiste à prendre un laser qui émet du rayonnement qui ne soit pas absorbé par l'air, le brouillard ou des obstacles similaires. Un laser pulsé au fluorure de deutérium qui fonctionne à 3,5 µm en constitue un exemple. Ce laser brûle toute la matière qu'il rencontre. De surcroît, l'évaporation du plasma produit par la combustion engendre un fort impact, de telle sorte que les personnes frappées par ce laser sont heurtées et blessées en même temps. Par chance, il est toujours difficile de concevoir un tel dispositif suffisamment robuste pour un usage pratique. Mais les experts s'attendent à ce que des lasers de combat apparaissent bientôt. En bref, il est probable que des armes basées sur du rayonnement soient présentées dans les années à venir*.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR L'ŒIL ET LES IMAGES

Réf. 89 L'herbe est généralement plus verte lorsqu'on la regarde à l'extérieur de la clôture.

* Ce qu'un homme travaillant sur ces développements raconte à ses enfants, lorsqu'il rentre le soir à la maison, n'est pas crédible.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 77 Comment les couleurs naturelles (en haut) changent pour trois types de daltoniens : deutan, protan et tritan. (© Michael Douma)

Pouvez-vous donner une explication, fondée sur des observations, concernant cette affirmation ?
Défi 154 s

* *

On entend dire que les astronomes ont des télescopes si puissants qu'ils peuvent voir si quelqu'un craque une allumette sur la Lune. Cela peut-il être vrai ?
Défi 155 s

* *

Lorsque deux rayons laser se croisent en formant un petit angle, ils peuvent engendrer des impulsions lumineuses qui semblent se déplacer plus vite que la lumière. Cela contredit-il la relativité restreinte ?
Réf. 92
Défi 156 s

* *

Le daltonisme fut découvert par le grand scientifique anglais John Dalton (1766–1844) – sur lui-même. Pouvez-vous imaginer comment il s'en est aperçu ? Il affecte, toutes formes confondues, un homme sur vingt. Dans de nombreuses langues, un homme qui ne distingue pas certaines couleurs est dit *daltonien*. Les femmes ne sont presque jamais daltoniennes, puisque cette caractéristique est reliée aux défauts situés sur le chromosome X. Si vous êtes daltonien, vous pouvez savoir de quel type de daltonisme vous faites partie à l'aide de la Figure 77.
Défi 157 pe
Réf. 94

* *

Les rayons lumineux, tels ceux émis par les lasers, sont généralement représentés sous forme de lignes. Toutefois, les rayons lumineux peuvent également être des *tubes*. Les rayons laser tubulaires, ou faisceaux de Bessel d'ordre supérieur, sont utilisés dans la recherche moderne pour guider des canaux plasma.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Est-il réellement possible de voir les étoiles depuis le fond d'un puits ou d'une fosse
Défi 158 s profonde, même pendant le jour, comme on l'affirme souvent ?

* *

L'imagerie occupe une place prépondérante dans l'industrie moderne. Sans les imprimantes laser, les photocopieurs, les lecteurs CD, les lecteurs DVD, les microscopes, les appareils photo numériques, les caméscopes numériques, les machines lithographiques pour la production des circuits intégrés, les télescopes, les projecteurs vidéo, notre monde paraîtrait beaucoup plus ennuyeux. Et les spécialistes qui travaillent dans ce do-
Réf. 95 maine fascinant ne sont pas assez nombreux dans le monde.

* *

Les systèmes d'imagerie les plus simples sont les lunettes. Un enfant qui n'aurait pas les verres correcteurs appropriés pourrait manquer une expérience importante : la contemplation des étoiles. Ce serait une perte considérable : un tel enfant ne comprendrait pas le
Page 196 sens de la phrase d'Emmanuel Kant, citée ci-dessus : « Deux choses remplissent le cœur d'une admiration et d'une vénération toujours nouvelles et toujours croissantes, à mesure que la réflexion s'y attache et s'y applique : le ciel étoilé au-dessus de moi et la loi morale en moi. »

Les charges sont discrètes – Les limites de l'électrodynamique classique

Un des résultats les plus importants de la physique est le suivant : la *charge électrique est discrète*, comme nous l'avons déjà mentionné à plusieurs reprises. La charge ne fluctue pas continûment, mais varie par paliers bien précis. Non seulement la nature exhibe une valeur minimale pour l'entropie et des quantités minimales de matière, mais elle révèle également l'existence d'une charge minimale. La charge électrique est quantifiée.

Dans les métaux, la quantification de la charge est perceptible dans le flux des électrons. Dans les électrolytes, c'est-à-dire les liquides électriquement conducteurs, la quantification de la charge survient dans le flux des atomes chargés, généralement appelés *ions*. Toutes les batteries renferment des électrolytes, l'eau aussi est un électrolyte, bien qu'elle soit faiblement conductrice. Dans les plasmas, comme le feu ou les ampoules fluorescentes, les ions et les électrons se déplacent et révèlent tous les deux le caractère discret de la charge. Dans le rayonnement également – des faisceaux d'électrons à l'intérieur des téléviseurs, des rayons canalisés formés dans des tubes spéciaux en verre, et du rayonnement cosmique jusqu'à la radioactivité – les charges sont quantifiées.

Dans toutes les expériences connues, la même valeur minimale pour la variation de la charge a été relevée. Le résultat est

$$\Delta q \geqslant e = 1{,}6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}\,. \tag{64}$$

En bref, la circulation d'électricité est due, de même que tous les courants présents dans la nature, à un courant de particules discrètes.

Une variation minimale de la charge entraîne une conséquence élémentaire : l'élec-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

trodynamique classique est *fausse*. Une charge minimale implique qu'aucune charge de référence infiniment petite ne peut exister. Mais de telles charges infiniment réduites sont nécessaires pour définir les champs électrique et magnétique. La limite sur la taille de la charge entraîne aussi qu'il n'existe aucune manière correcte de définir un courant électrique instantané et, par conséquent, que les valeurs du champ électrique et magnétique sont pertinemment floues. Les équations d'évolution de Maxwell ne sont donc qu'approximatives.

Nous étudierons les principaux effets du caractère discret de la charge dans la partie sur la théorie quantique. Seuls quelques effets de la quantification de la charge peuvent être traités en physique classique. En voici un exemple didactique.

Page ??

À QUELLE VITESSE LES CHARGES SE DÉPLACENT-ELLES ?

Dans le vide, comme à l'intérieur d'un téléviseur couleur, les particules chargées accélérées par une tension de 30 kV se déplacent au tiers de la vitesse de la lumière. Dans les accélérateurs de particules modernes, les charges filent si rapidement que leur vitesse est, à titre pratique, indiscernable de celle de la lumière.

Défi 159 s

Dans un métal, les signaux électriques se déplacent à des vitesses de l'ordre de la vitesse de la lumière. La valeur exacte dépend de la capacité électrique et de l'impédance du câble : elle est généralement située dans l'intervalle de $0,3c$ à $0,5c$. Cette vitesse élevée est due à l'aptitude des métaux à assimiler rapidement des charges en arrivée et à évacuer avec facilité les autres. Cette potentialité de réaction rapide est engendrée par la forte mobilité des charges situées à l'intérieur des métaux, ce qui est en fait dû à la masse et à la taille minuscules de ces charges, les électrons.

La vitesse de signal élevée dans les métaux semble contredire une autre constatation. La vitesse de dérive des électrons dans un fil métallique vérifie manifestement

$$v = \frac{I}{Ane} \,, \tag{65}$$

où I représente le courant, A la surface d'une section du fil, e la charge d'un unique électron et n la densité numérique d'électrons. La densité d'électrons dans le cuivre est de $8{,}5 \cdot 10^{28}\,\mathrm{m}^{-3}$. En utilisant un courant caractéristique de 0,5 A et une surface de section typique d'un millimètre carré, nous obtenons une vitesse de dérive de 0,37 µm/s. Autrement dit, les électrons se déplacent des milliers de fois plus lentement que du ketchup dans sa bouteille. Pire, si une lampe de salon utilisait du courant continu au lieu du courant alternatif, les électrons mettraient plusieurs jours pour aller de l'interrupteur à l'ampoule ! Cependant, la lampe s'allume et s'éteint presque instantanément après que l'interrupteur a été actionné. De manière similaire, les électrons associés à un courriel transporté avec du courant continu parviendraient à leur destinataire beaucoup plus tard qu'une lettre envoyée au même moment. Pourtant, on constate que le courriel arrive rapidement. Êtes-vous capable d'expliquer la contradiction apparente qui existe entre la vitesse de dérive et la vitesse du signal ?

Défi 160 s

Dans les liquides, les charges se déplacent à une vitesse différente de celle à l'intérieur des métaux, et leur rapport charge sur masse est également différent. Nous en avons tous conscience par le résultat d'expériences directes. Nos *nerfs* fonctionnent en utilisant des

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

signaux électriques et mettent (seulement) quelques millisecondes pour réagir à un stimulus, bien qu'ils fassent plusieurs mètres de long. Une vitesse analogue est observée dans les semi-conducteurs et dans les batteries. Dans tous ces systèmes, la charge en mouvement est transportée par des *ions* : ce sont des atomes chargés. Les ions, comme les atomes, sont de grandes entités composées, contrairement aux minuscules électrons.

Dans d'autres systèmes, les charges se déplacent à la fois comme les électrons et les ions. Les lampes à néon, le feu, les plasmas et le Soleil en sont des exemples. Dans les atomes, les électrons se comportent de manière encore plus étrange. Nous avons tendance à penser qu'ils gravitent autour du noyau (comme nous le verrons plus tard) à une vitesse plutôt élevée, puisque le rayon orbital est vraiment petit. Cependant, il apparaît que dans la plupart des atomes de nombreux électrons ne tournent pas du tout autour du noyau. Cette histoire déroutante dissimulée derrière les atomes et leur structure sera contée dans la partie quantique de notre ascension montagneuse. Page ??

Curiosités et défis amusants sur les charges discrètes

Comment pourriez-vous montrer de manière expérimentale que la charge électrique se manifeste en fragments élémentaires ? Défi 161 s

* *

Le caractère discret de la charge implique que nous pouvons évaluer la taille des atomes en observant la déposition galvanique. Comment ? Défi 162 pe

* *

Les rayons cosmiques sont constitués de particules chargées qui heurtent la Terre. (Nous en discuterons plus en détail ultérieurement.) Les astrophysiciens expliquent que ces particules sont accélérées par les champs magnétiques régnant autour de la Galaxie. Cependant, l'expression de l'accélération de Lorentz indique que les champs magnétiques peuvent modifier uniquement la direction de la vitesse d'une charge, et non sa grandeur. Comment la nature peut-elle néanmoins engendrer une accélération ? Page ?? Réf. 85 Défi 163 pe

* *

Quel serait le potentiel en volt de la Terre si nous pouvions extirper tous les électrons d'une goutte d'eau ? Défi 164 s

* *

Lorsqu'une tension est appliquée à une résistance, combien de temps faut-il pour atteindre la valeur finale du courant, donnée par la « loi » d'Ohm ? Le premier à avoir répondu à cette question fut Paul Drude* autour des années 1900. Il raisonna ainsi : lorsque le courant est activé, la vitesse v d'un électron augmente selon $v = (eE/m)t$, où E est le champ électrique, e la charge et m la masse de l'électron. Le modèle de Drude suppose que l'accroissement de la vitesse électronique cesse lorsque l'électron heurte un atome,

* Paul Karl Ludwig Drude (1863–1906) fut un physicien allemand. Une conséquence de son modèle de gaz d'électrons pour les métaux fut la prédiction, approximativement correcte, que le rapport entre la conductivité thermique et la conductivité électronique à une température donnée devrait être identique pour tous les métaux. Drude introduisit également la notation c pour la vitesse de la lumière.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

perd de son énergie et commence à nouveau à être accéléré. Drude déduisit que le temps moyen τ s'écoulant jusqu'à la collision est relié à la résistance spécifique par

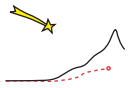
$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{E}{envv} = \frac{2m}{\tau e^2 n} \,, \tag{66}$$

n représentant la densité numérique d'électrons. Le membre de droite ne dépend plus de E : c'est une constante. Drude avait ainsi expliqué la *relation d'Ohm* $U = RI$ (ou $E = j\rho$) à partir des propriétés de la matière, en supposant que la résistance est due aux électrons en mouvement qui entrent continuellement en collision puis accélèrent à nouveau. En remplaçant par les valeurs relatives au cuivre ($n = 10{,}3 \cdot 10^{28}\,/\mathrm{m}^{-3}$ et $\rho = 0{,}16 \cdot 10^{-7}\,\Omega\mathrm{m}$), nous trouvons un temps $\tau = 42\,\mathrm{ps}$. Cette durée est si brève que le processus d'activation peut généralement être négligé.

* *

Est-il sensé d'écrire les équations de Maxwell pour le vide ? Les champs électrique et magnétique requièrent tous les deux des charges pour pouvoir être mesurés. Mais dans le vide il n'y a plus de charges. Pire, les champs sont définis en faisant appel à des charges de référence infiniment petites. Mais de telles charges n'existent pas. En réalité, seule la théorie quantique démêle cette contradiction apparente. Êtes-vous capable d'imaginer comment ?

Défi 165 d



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Chapitre 5

EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

L'éclair est-il une décharge électrique ? – L'électricité dans l'atmosphère

En observant attentivement l'atmosphère, on remarque qu'elle est remplie d'effets électriques. Le phénomène électrique le plus impressionnant que nous relevons, l'éclair, est dorénavant raisonnablement bien compris. Dans un nuage orageux, particulièrement dans les nuages* *cumulonimbus* de grande taille, les charges sont séparées par les collisions survenant entre les gros « grêlons » de cristaux de glace, qui chutent à cause de leur poids, et les petits « granules » de glace cristallisée s'élevant grâce à la convection thermique dirigée vers le haut. Puisque la collision participe à la création d'un champ électrique, les charges sont séparées de manière similaire au mécanisme présent dans le générateur de Kelvin. Les décharges se produisent lorsque le champ électrique devient trop élevé ; elles empruntent une trajectoire étrange influencée par les ions produits dans l'air par les rayons cosmiques. Il semble que les rayons cosmiques soient, au moins en partie, responsables de la forme en zigzag de l'éclair.

Réf. 96
Réf. 98
Page 19

Les flashs des éclairs possèdent d'étranges propriétés. *Primo*, ils apparaissent dans des champs avoisinant les 200 kV/m (à faible altitude) au lieu des 2 MV/m pour les étincelles normales. *Deusio*, les éclairs émettent des pulsations radio. *Tertio*, ils émettent des rayons gamma. Des chercheurs russes, à partir de 1992, ont expliqué ces trois effets grâce à un mécanisme de décharge nouvellement découvert. À des échelles de longueur de 50 m et plus, les rayons cosmiques peuvent déclencher l'apparition de l'éclair, l'énergie relativiste de ces rayons autorisant la production d'un mécanisme de décharge qui n'existe pas pour des électrons de basse énergie. Aux énergies relativistes, ce que nous appelons une avalanche électronique provoque des décharges dans des champs beaucoup plus faibles que les étincelles courantes de laboratoire. La multiplication de ces électrons relativistes conduit également aux émissions observées de rayons gamma et radio.

Réf. 99

* Les nuages ont des noms latins, introduits en 1802 par l'explorateur anglais Luke Howard (1772–1864). Il découvrit que tous les nuages peuvent être vus comme des variantes de trois types de base, qu'il dénomma *cirrus*, *cumulus* et *stratus*. Il appela la combinaison des trois, le nuage de pluie, *nimbus* (signifiant en latin « gros nuage »). Aujourd'hui, le consensus sur le système internationalement accepté a été légèrement ajusté et distingue les nuages en fonction de la hauteur de leur base. Les nuages qui apparaissent au-dessus d'une altitude de 6 km sont les cirrus, les cirrocumulus et les cirrostratus ; ceux qui s'élèvent à des altitudes comprises entre 2 et 4 km sont les altocumulus, les altostratus et les nimbostratus ; les nuages que l'on trouve en dessous d'une altitude de 2 km sont les stratocumulus, les stratus et les cumulus. Le nuage d'averse ou d'orage, qui s'étend sur toutes ces altitudes, est aujourd'hui appelé *cumulonimbus*. Pour des représentations magnifiques de nuages, consultez les sites Web www.goes.noaa.gov et www.osei.noaa.gov.

Réf. 97

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 78 Cumulonimbus vus du sol et de l'espace. (NASA)

Par ailleurs, vous avez 75 % de chance de survivre après avoir été frappé par la foudre, surtout si vous êtes complètement mouillé, puisque dans cette situation le courant s'écoulera en dehors de la peau. Généralement, les personnes humides qui sont électrocutées perdent tous leurs vêtements, car l'eau qui s'évapore les arrache. Une réanimation urgente est primordiale pour sauver quelqu'un après un coup de foudre*.

En remarque, vous devriez savoir comment mesurer la distance d'un éclair en comptant les secondes écoulées entre l'éclair et le tonnerre et en multipliant cela par la vitesse du son, 330 m/s. Nous savons beaucoup moins que nous pouvons estimer la *longueur* de l'éclair en mesurant la *durée* du tonnerre et en la multipliant par le même facteur.

Au cours des années 1990, nous avons collecté plus d'informations sur le phénomène électrique accompagnant les orages. Les pilotes de ligne et les passagers observent parfois des émissions de lumière faible et colorée qui se propagent au sommet des nuages orageux. Il en existe divers types : les *jets* bleus et principalement les *sylphes* rouges (également dénommés farfadets ou sprites) et les *elfes* (ou halos), qui sont d'une manière ou d'une autre causés par les champs électriques situés entre la cime du nuage et l'ionosphère. Les détails sont toujours en cours de recherche, et les mécanismes sous-jacents ne sont pas encore élucidés**.

Toutes ces particularités font partie intégrante du circuit électrique qui siège tout autour de la Terre. Ce domaine fascinant de la géophysique nous conduirait trop loin de notre objectif relatif à cette ascension montagneuse. Mais chaque physicien devrait savoir qu'il existe un champ électrique vertical ambiant compris entre 100 et 300 V/m lors d'une journée dégagée, comme cela avait déjà été découvert en 1752. (Pouvez-vous deviner pourquoi nous ne nous en apercevons pas dans la vie quotidienne ? Et pourquoi, en dépit de sa valeur, il ne peut pas être mis à profit pour produire de grosses quantités d'énergie ?) Ce champ est orienté de l'ionosphère vers le bas, en direction du sol. En réalité, la Terre est constamment chargée négativement, et par temps clair le courant

Défi 166 s

* Si jamais vous êtes frappé par la foudre et que vous survivez, allez à l'hôpital ! Beaucoup de personnes sont décédées trois jours après avoir négligé de le faire. Un coup de foudre entraîne souvent des effets de coagulation dans le sang. Ces substances obstruent les reins, et nous pouvons mourir trois jours plus tard à cause de dysfonctionnements rénaux. Le remède consiste à subir un traitement par dialyse.

** Pour des images, jetez un œil sur les sites Web captivants elf.gi.alaska.edu/, www.fma-research.com/spriteres.htm et pasko.ee.psu.edu/Nature/.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

circule vers le bas à travers l'atmosphère dégagée, tentant ainsi de *décharger* électriquement notre planète. Ce courant d'environ 1 kA est diffusé sur la planète entière, ce qui demeure possible grâce aux ions formés par le rayonnement cosmique. (La résistance entre la terre et l'ionosphère est de 200 Ω environ, donc la chute de tension totale est d'à peu près 200 kV.) En même temps, la Terre est constamment *chargée* par plusieurs effets : un effet dynamo dû aux forces de marée agissant sur l'atmosphère, et des courants induits par la magnétosphère. Mais l'effet le plus important reste l'éclair. En d'autres termes, contrairement à ce que nous pouvons penser, l'éclair ne décharge pas le sol, en réalité
Réf. 100 il le recharge* ! Bien évidemment, l'éclair doit décharger la différence de potentiel qui existe entre le nuage et la terre, mais ce faisant il transmet en fait une charge négative à la Terre tout entière. Les nuages d'orage sont des batteries, l'énergie issue de ces batteries provient des mouvements de convection thermique, dirigés vers le haut et mentionnés ci-dessus, qui transportent la charge *à l'encontre* du champ électrique global ambiant.

En utilisant quelques stations de mesures électriques qui relèvent les variations du champ électrique de la Terre, il est possible de localiser tous les éclairs qui descendent
Réf. 101 sur la Terre à un instant donné. De cette manière, des recherches actuelles espèrent également mesurer l'activité des sylphes et des elfes électriques correspondants.

Les ions présents dans l'air jouent un rôle dans le chargement des nuages d'orage via le chargement des cristaux de glace et des gouttes de pluie. En général, toutes les minuscules particules dans l'air sont électriquement chargées. Lorsque des avions et des hélicoptères volent, ils frappent généralement plus de particules d'une charge donnée que d'autres. Par conséquent, ceux-ci se chargent au cours du vol. Quand un hélicoptère est utilisé pour sauver des gens situés sur un radeau en pleine mer, la corde qui tire les personnes vers le haut doit avant tout être reliée à la terre en la laissant pendre dans l'eau. Si ce n'est pas le cas, les personnes situées sur le radeau peuvent mourir de choc électrique en touchant la corde, comme cela s'est malheureusement déjà produit à plusieurs reprises par le passé.

Les charges présentes dans l'atmosphère offrent de nombreux autres effets. Des expériences récentes ont confirmé ce que l'on prédisait déjà au début du vingtième siècle :
Réf. 102 l'éclair émet des rayons X. Cette confirmation n'est pas aisée cependant, il est nécessaire de placer un détecteur près du flash de l'éclair. Pour y parvenir, l'éclair doit être attiré dans une région donnée. C'est possible en utilisant un missile qui tire un fil métallique, l'autre extrémité de celui-ci étant attachée au sol. Ces résultats expérimentaux sont maintenant en train d'être rassemblés pour façonner une nouvelle description de l'éclair qui explique également les farfadets rouge-bleu situés au-dessus des nuages. En particulier, ces processus impliquent aussi qu'à l'intérieur des nuages les électrons puissent être ac-
Réf. 103 célérés jusqu'à des énergies de quelques MeV.

Pourquoi les étincelles et les éclairs sont-ils bleus ? Il apparaît que cela est lié à une propriété matérielle : la couleur provient de la matière qui est excitée par l'énergie de la décharge, généralement l'air. Cette excitation est due à la température de 30 kK qui règne à l'intérieur de la cavité du flash d'un éclair caractéristique. Pour les étincelles courantes, la température est beaucoup plus basse. En fonction de la situation, la couleur peut émaner du gaz situé entre les deux électrodes, tel que l'oxygène ou l'azote, ou elle peut être due à la matière qui se volatilise sur les électrodes par la décharge électrique.

Défi 167 s * La Terre est ainsi chargée à environ −1 MC. Pouvez-vous le confirmer ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

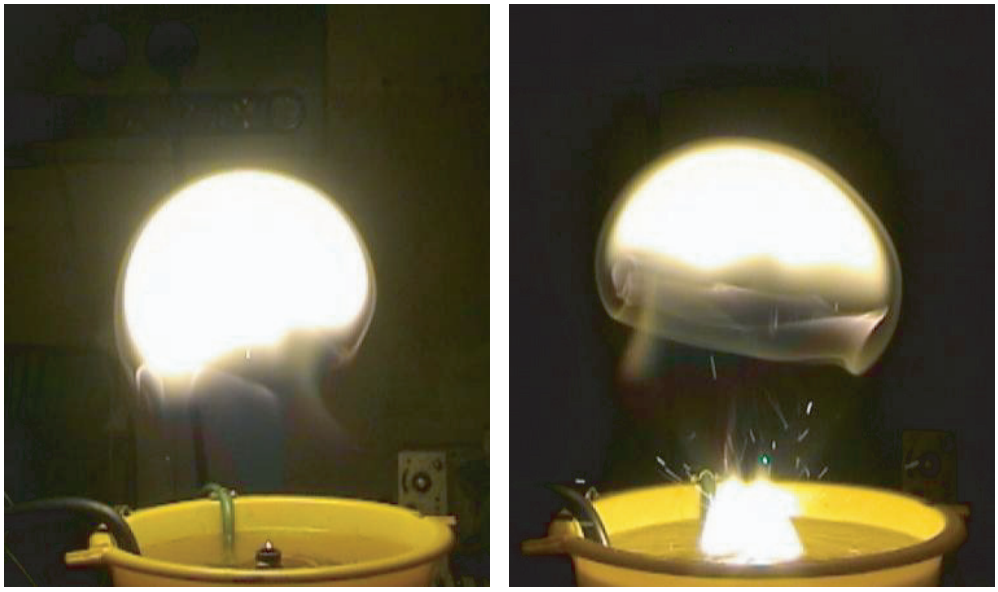


FIGURE 79 Un nuage de plasma flottant, produit en laboratoire. (© Sergei Emelin et Alexei Pirozerski)

Pour avoir une explication de ces couleurs, ainsi que pour l'explication de toutes les couleurs provenant de la matière, nous devons patienter jusqu'à la prochaine partie de notre promenade.

Mais il n'y a pas que les champs électriques qui soient dangereux. Les champs électromagnétiques qui varient dans le temps peuvent également l'être. En 1997, par un temps magnifiquement calme, une montgolfière hollandaise s'est approchée de l'émetteur radio puissant situé à Hilversum. Après avoir voyagé pendant quelques minutes près de l'antenne, la nacelle se détacha soudainement du ballon, tuant tous les passagers situés à l'intérieur.

Une équipe enquêta quelques semaines plus tard pour reconstituer les faits. Dans les montgolfières modernes, la nacelle est suspendue par des cordes en nylon de haute qualité. Pour éviter les accidents dus à l'orage et afin de contourner les problèmes de chargement en électricité statique, toutes ces cordes en nylon contiennent de minces fils métalliques qui forment une vaste surface équipotentielle autour du ballon tout entier. Malheureusement, face à l'émetteur radio, ces minuscules fils métalliques absorbèrent l'énergie radio transmise par l'émetteur, devinrent brûlants et firent fondre les fils en nylon. Ce fut la toute première observation de ce phénomène.

Les boules de feu existent-elles ?

Réf. 104

Durant des centaines d'années, des individus ont rapporté des observations concernant ce que nous appelons les *boules de feu*. Généralement, elles furent remarquées pendant des orages, souvent après qu'un éclair eut surgi du ciel. Excepté quelques cas, personne ne considéra ces signalements avec sérieux, parce qu'aucune donnée reproductible n'était disponible.

Lorsque les fours micro-ondes devinrent populaires, plusieurs méthodes permettant

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de produire des décharges en forme de boule apparurent. Pour en observer une, enfoncez simplement un cure-dent dans une bougie, allumez le cure-dent et placez-le dans un four micro-ondes (d'une autre personne) à la puissance maximale. Ce dispositif produit une magnifique décharge en forme de boule. Cependant, les hommes ne vivent pas dans un four micro-ondes.

Cette situation expérimentale changea du tout au tout dans les années 1999 à 2001. Au cours de ces années-là, les physiciens russes Anton Egorov et Gennady Shabanov
Réf. 105 découvrirent une manière de produire des nuages de plasma, ou *plasmoïdes*, flottant en l'air, en employant trois ingrédients principaux : de l'eau, du métal et une haute tension. Si la haute tension est appliquée à des électrodes métalliques immergées de forme et de fabrication appropriées, des nuages de plasma, d'une taille d'environ 10 à 20 cm, émergent de l'eau, flottent au-dessus de la surface puis disparaissent après environ une demi-seconde. Deux exemples peuvent être observés sur la Figure 79.

Le phénomène des plasmoïdes volants est toujours en cours d'étude. Il existe des variantes en forme, en couleur, en taille et en durée de vie. La panoplie des observations et des techniques se développera certainement dans les années à venir.

Un effet encore plus frappant fut publié en 2007. Une équipe brésilienne de chercheurs
Réf. 106 découvrit une manière de produire des décharges de la taille d'une balle de golf, qui semblent rouler sur le sol pendant une durée de 8 s. Leur méthode était merveilleusement simple : à l'aide d'une alimentation électrique de 25 V, ils envoyèrent un courant de 140 A à travers un arc à la surface d'une couche de silicium. Ils découvrirent que des petites particules de silicium se détachent puis s'écartent, tout en s'entourant d'un éclat lumineux. Ces nuages lumineux peuvent déambuler sur la table et le plancher du laboratoire, jusqu'à ce qu'ils s'éteignent.

Il semble que ces phénomènes pourraient donner une explication à un grand nombre d'observations fondées sur les boules de feu.

La gravité fait-elle rayonner les charges ?

Nous avons appris dans la section sur la relativité générale que la gravitation possède le même effet que l'accélération. Cela signifie qu'une charge qui demeure figée à une certaine hauteur est équivalente à une charge accélérée à 9,8 m/s^2, ce qui impliquerait qu'elle émette du rayonnement électromagnétique, puisque toute charge accélérée rayonne. Cependant, le monde qui nous entoure est empli de charges situées à des hauteurs fixes, et on ne détecte pas pour autant de rayonnement de ce type. Comment cela est-il possible ?

Réf. 107 Cette question est restée un sujet de prédilection pendant de nombreuses années. D'une manière générale, le concept de rayonnement n'est pas invariant selon l'observateur : si un observateur détecte du rayonnement, un deuxième ne le fera pas nécessairement de façon identique. La manière exacte selon laquelle un champ de rayonnement varie d'un observateur à l'autre dépend du type de mouvement relatif et du champ lui-même.

Une solution exhaustive à ce problème montre que, pour une charge uniformément accélérée, un observateur subissant la même accélération détectera seulement un champ électrostatique. Au contraire, un observateur inertiel détectera un champ de
Réf. 108 rayonnement. Puisque la gravité est (à une précision élevée) équivalente à une accéléra-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

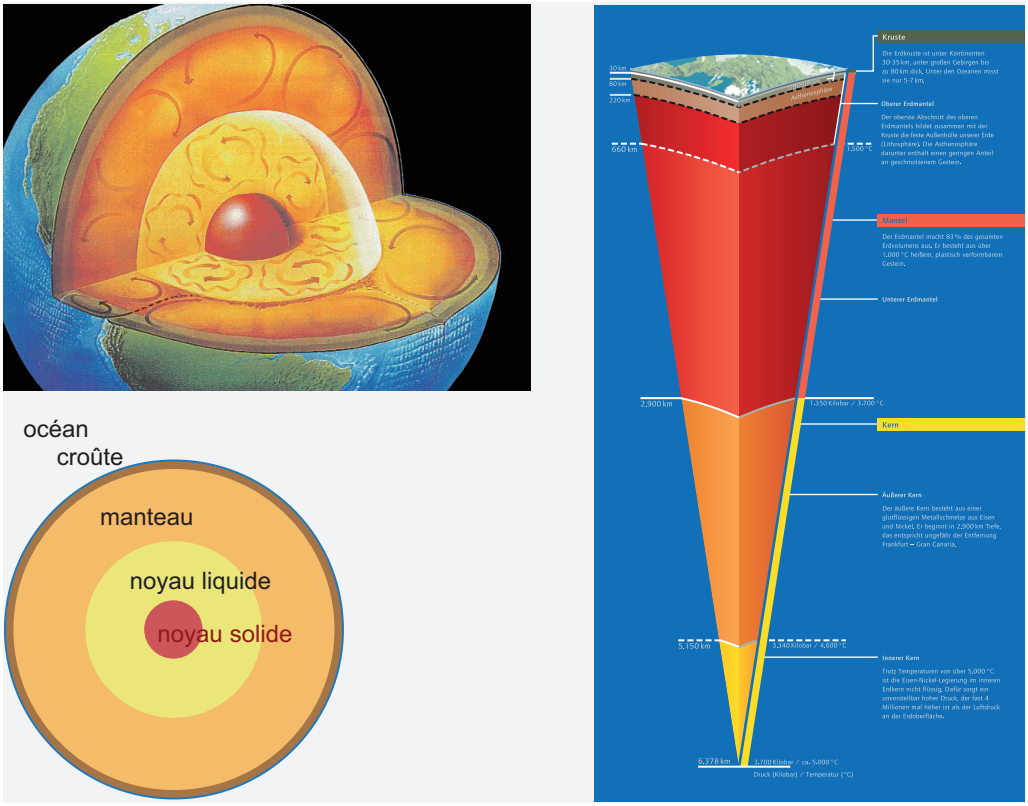


FIGURE 80 La structure de notre planète. (© MPI-Chemie, Mainz/GEO)

tion uniforme, nous en déduisons un résultat élémentaire : la gravité ne fait pas rayonner les charges électriques pour un observateur au repos par rapport aux charges, tel que nous l'observons. Ce résultat reste vrai également dans la description de la théorie quantique.

QUESTIONS DE RECHERCHE

La description classique de l'électrodynamique est cohérente et complète. Néanmoins, il existe toujours de nombreux sujets de recherche, et nous en donnons ici quelques-uns d'entre eux.

L'origine du champ magnétique de la Terre, des autres planètes, du Soleil et même de la Galaxie constitue un domaine fascinant. La manière dont la convection des fluides situés à l'intérieur des planètes génère les champs magnétiques, un problème intrinsèquement tridimensionnel, l'influence de la turbulence, des non-linéarités et du chaos font de ce sujet une question étonnamment complexe.

C'est seulement dans la seconde moitié du vingtième siècle que les détails de la création du champ magnétique terrestre, que l'on nomme habituellement la *géodynamo*, commencèrent à se dévoiler, lorsque la connaissance de l'intérieur de la Terre eut atteint un niveau suffisant. L'intérieur de la Terre commence à partir de la croûte terrestre. La *croûte* possède une épaisseur typique de 30 à 40 km (sous les continents), bien qu'elle soit

Réf. 26

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

plus épaisse sous les grandes chaînes de montagnes et plus fine près des volcans ou sous les océans. Comme nous l'avons déjà mentionné, la croûte est constituée de vastes fragments, les *plaques*, qui bougent les uns par rapport aux autres. La structure interne de la Terre est partagée entre le *manteau* – les 2 900 premiers kilomètres à partir de la surface – et le *noyau*. Le noyau est composé d'un noyau *externe* liquide, de 2 210 km d'épaisseur, et d'un noyau *interne* solide de 1 280 km de rayon. (La température du noyau est connue de manière approximative, nous pensons qu'elle se situe entre 6 et 7 kK. Pouvez-vous découDéfi 168 d vrir un procédé permettant de la mesurer ? Cette température a dû décroître de quelques centaines de kelvin au cours des 3 milliards d'années qui viennent de s'écouler.)

Le noyau de la Terre est principalement composé de fer, collecté à partir des astéroïdes qui sont entrés en collision avec celle-ci dans sa jeunesse. Il semble que le noyau externe liquide, conducteur électrique, agisse comme une dynamo qui entretient le champ magnétique. L'énergie magnétique provient de l'énergie cinétique de ce noyau externe, qui tourne à une vitesse différente de la surface terrestre. Le fluide peut agir comme une dynamo parce que, mis à part qu'il tourne, il subit également des mouvements de *convection*, depuis le cœur profond de la Terre jusqu'à des niveaux plus superficiels, mus par les gradients de température qui existent entre le noyau interne brûlant et le manteau tiède. Des courants électriques colossaux circulent de manière compliquée à travers ces couches liquides, entretenus par le frottement, et engendrent le champ magnétique. Le fait que ce champ change brusquement d'orientation à intervalles irréguliers compris entre quelques dizaines de milliers et quelques millions d'années, représente une des questions majeures. Les réponses sont difficiles, les expériences ne sont pas encore possibles ; 150 années de mesures constituent une courte durée lorsque nous la comparons à la dernière transition – il y a environ 730 000 ans – et les simulations par ordinateur sont extrêmement délicates. Depuis que les relevés du champ magnétique ont commencé, son moment dipolaire a diminué de manière stable, actuellement il est de 5 % par an, et le moment quadupolaire a continuellement augmenté. Peut-être sommes-nous en train d'assister à un revirement de situation*. (Par ailleurs, l'étude des champs magnétiques *galactiques* est encore plus complexe, et en est toujours à ses balbutiements.)

Une autre énigme majeure concernant l'électricité résulte de l'équivalence entre la masse et l'énergie. Nous savons de manière certaine, par les expériences, que la taille d Réf. 110 des électrons est inférieure à 10^{-22} m. Cela signifie que le champ électrique qui l'entoure Défi 169 e possède un contenu énergétique E au minimum donné par

$$E_{\text{nergie}} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \int E^2_{\text{lectrique du champ}}\, \mathrm{d}V = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \int_d^\infty \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2}\right)^2 4\pi r^2 \mathrm{d}r$$
$$= \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_o}\frac{1}{d} > 1{,}2\,\mu\mathrm{J}\ . \qquad (67)$$

D'un autre côté, la *masse* d'un électron, généralement fixée à $511\,\mathrm{keV/c^2}$, correspond à une énergie de 82 fJ seulement, dix millions de fois *inférieure* à la valeur que nous venons de calculer. Autrement dit, l'électrodynamique classique a énormément de difficultés à décrire les électrons. En fait, une description cohérente des particules ponctuelles char-

* En 2005, on a signalé que le noyau interne de la Terre semble tourner jusqu'à un demi-degré par an plus Réf. 109 vite que la croûte continentale.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 111 gées dans le cadre de l'électrodynamique classique est impossible. Ce sujet admirable fait l'objet d'un intérêt plutôt sporadique – mais alors souvent enthousiaste – de nos jours, parce que cette énigme est résolue d'une manière différente dans la partie quantique, à venir, de notre ascension montagneuse.

Bien que la période glorieuse des sciences de la matière soit maintenant révolue, les diverses propriétés électromagnétiques de la matière et leurs applications dans les dispositifs pratiques ne semblent pas encore être complètement explorées. À peu près une fois par an, un effet nouveau est découvert, lequel mérite d'être introduit dans la liste des pro-
Page 138 priétés électromagnétiques de la matière du Tableau 14. Entre autres, certaines nouvelles technologies semi-conductrices auront toujours un impact sur l'électronique, telle la récente introduction de circuits intégrés de détection de lumière à faible coût construits en technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor).

La conception de sources lumineuses de haute qualité a été un défi durant de nombreux siècles et en reste un pour l'avenir. Les sources lumineuses qui sont intenses, ajustables et qui ont de grandes longueurs de cohérence ou des sources qui émettent des longueurs d'onde extrêmes sont cruciales pour la poursuite d'une multitude de recherches. Comme exemple parmi tant d'autres, les premiers lasers à rayons X ont récemment été construits. Toutefois, ils ont une taille de plusieurs centaines de mètres et utilisent des accélérateurs de particules adaptés. La construction de lasers à rayons X compacts restera hors de portée pour de nombreuses années – si jamais cela reste du domaine du possible.

L'électrodynamique et la relativité générale interagissent de plusieurs façons. Seul un petit nombre de situations ont été étudiées jusqu'à présent. Elles sont importantes pour l'étude des trous noirs et du vide. Par exemple, il semble que les champs magnétiques
Réf. 112 accroissent la rigidité de l'espace vide. Un grand nombre de sujets similaires seront dévoilés dans le futur.

Mais le plus grand défi imaginable en électrodynamique classique reste peut-être l'interprétation des courants électriques présents dans le cerveau. Sera-t-il possible de lire nos pensées par le truchement d'un appareil placé à l'extérieur du crâne ? Nous pour-
Défi 170 r rions commencer avec un défi plus simple : serait-il possible de discerner la pensée « oui » de la pensée « non » en mesurant les champs électriques ou magnétiques présents autour de la tête ? En d'autres termes, la lecture de la pensée est-elle réalisable ? Il est probable que le vingt et unième siècle apportera une réponse positive. Si c'est le cas, l'équipe qui parviendra à réaliser cette prouesse deviendra immédiatement célèbre.

Lévitation

Nous avons vu qu'il est possible de déplacer certains objets sans même les toucher, en utilisant un champ magnétique ou électrique, ou, bien sûr, en utilisant la gravitation. Est-il également possible, sans toucher un objet, de le faire flotter à une position figée en l'air ? Ce type de repos existe-t-il ?

Il apparaît qu'il existe plusieurs méthodes pour faire léviter des objets. Celles-ci sont communément divisées en deux groupes : celles qui consomment de l'énergie et celles
Réf. 113 qui n'en consomment pas. Parmi les méthodes qui consomment de l'énergie, citons la lévitation des objets sur un jet d'air ou d'eau, la flottaison des objets à travers des ondes sonores, par exemple sur le dessus d'une sirène, ou par un rayon laser émis par-dessous, et la lévitation de matériaux conducteurs, et même de liquides, dans de forts champs

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

radiofréquence. La lévitation des liquides ou des solides par des ondes ultrasonores puis-
Réf. 114 santes est actuellement largement diffusée dans les laboratoires. Toutes ces méthodes fournissent une lévitation *stationnaire*. Un autre groupe de méthodes qui consomment de l'énergie détecte la manière dont un corps est en train de chuter et lui communique une impulsion dans la bonne direction par le biais d'une boucle de rétroaction. Ces méthodes sont *non stationnaires* et utilisent généralement des champs magnétiques pour s'assurer que l'objet ne tombe pas. Le train magnétique en cours de construction à Shan-
Réf. 115 ghai par un consortium allemand est mis en lévitation de cette manière. Le train tout entier, y compris ses passagers, est mis en lévitation et avance alors en utilisant des électroaimants. Il est ainsi possible, en faisant usage d'aimants, de faire léviter plusieurs dizaines de tonnes de matière.

Pour les méthodes de lévitation qui *ne* consomment *pas* d'énergie – tous ces procédés sont nécessairement stationnaires – une contrainte bien connue peut être retrouvée en étudiant la « loi » de Coulomb de l'électrostatique : aucune disposition statique de champs électriques ne peut faire librement léviter un objet *chargé* dans l'espace ou en l'air. La même chose est vraie pour les champs gravitationnels et des objets *massifs**. En d'autres termes, nous ne pouvons pas produire un minimum local pour l'énergie potentielle au milieu d'une cavité en utilisant des champs électriques ou gravitationnels.
Réf. 116 Cette impossibilité est dénommée le *théorème d'Earnshaw*. Mathématiquement parlant, les solutions de l'équation de Laplace $\Delta\varphi = 0$, dites *fonctions harmoniques*, possèdent des minima ou des maxima uniquement à la frontière, mais jamais à l'intérieur du domaine de définition. (Vous l'avez démontré vous-même à la page 126.) Ce théorème peut également être démontré en remarquant que, si l'on se donne un minimum du potentiel dans l'espace libre, le théorème de Gauss pour une sphère située autour de ce minimum exige qu'une source de ce champ soit présente à l'intérieur, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse de départ.

Nous pouvons également déduire qu'il est impossible d'utiliser des champs électriques pour faire léviter un corps électriquement *neutre* en l'air : l'énergie potentielle U d'un tel corps, de volume V et de constante diélectrique ε, placé dans un environnement de constante diélectrique ε_0, est donnée par

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2}(\varepsilon - \varepsilon_0)E^2 \quad . \tag{68}$$

Puisque le champ électrique E ne possède jamais un maximum en l'absence de charge
Défi 171 pe dans l'espace, et puisque pour tous les matériaux $\varepsilon > \varepsilon_0$, il ne peut y avoir un minimum pour l'énergie potentielle dans l'espace libre pour un corps neutre**.

Pour résumer, en utilisant des champs électriques statiques ou gravitationnels statiques, il est impossible de maintenir un objet sans qu'il chute. Ni la mécanique quan-

* À la grande déception des nombreux fans de science-fiction, ce serait encore vrai si une masse négative
Page 78 existait. Et même si la gravité n'est pas réellement engendrée par un champ mais par la courbure de l'espace-temps, ce résultat tient toujours en relativité générale.

Réf. 117 ** Il est possible, cependant, de « faire léviter » des bulles de gaz dans des liquides – les « piéger » pour les empêcher de s'élever serait une expression plus appropriée – parce que, dans un tel cas, la constante diélectrique de l'environnement est supérieure à celle du gaz. Pouvez-vous trouver une combinaison liquide–
Défi 172 pe gaz où les bulles tombent au lieu de s'élever ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

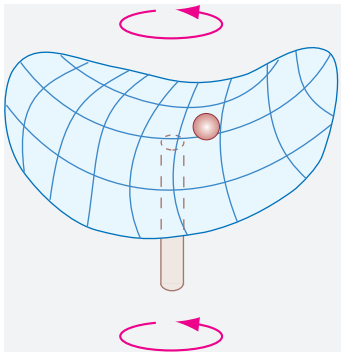


FIGURE 81 Piéger une sphère métallique en utilisant un foret à vitesse variable et une selle en plastique.

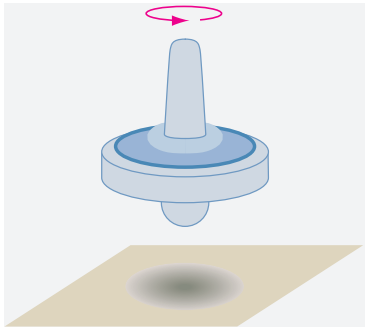


FIGURE 82 La « magie » de la lévitation maintenant disponible dans les magasins de jouets.

tique, qui incorpore des manifestations telles que l'antimatière, ni la relativité générale, qui inclut des phénomènes tels que les trous noirs, ne font fléchir ce résultat fondamental.

Pour des champs *magnétiques* statiques, l'argumentation est analogue à celle des champs électriques : l'énergie potentielle U d'un corps aimantable de volume V et de perméabilité μ placé dans un milieu ayant une perméabilité μ_0 ne contenant aucun courant est donnée par

Défi 173 pe

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_0}\right)B^2 \tag{69}$$

et, à cause de l'inégalité $\Delta B^2 \geqslant 0$, des maxima isolés pour un champ magnétique statique ne sont pas possibles, seuls des minima isolés le sont. Par conséquent, il est impossible de faire léviter des matériaux paramagnétiques ($\mu > \mu_0$) ou ferromagnétiques ($\mu \gg \mu_0$) tels que l'acier, y compris des barres aimantées, qui sont tous attirés vers les maxima du champ magnétique, et non pas repoussés.

Défi 174 e

Il existe donc deux manières d'obtenir la lévitation magnétique : faire léviter un matériau diamagnétique ou utiliser un champ qui varie dans le temps. Les matériaux diamagnétiques ($\mu < \mu_0$) peuvent être mis en lévitation par des champs magnétiques statiques parce qu'ils sont attirés vers les minima du champ magnétique. L'exemple le plus connu est la lévitation des supraconducteurs, qui sont, au moins pour ceux de type I, des diamagnétiques parfaits ($\mu = 0$). Des forces puissantes peuvent être engendrées, et cette méthode est également en cours d'essai au Japon pour la lévitation des trains de voyageurs. Dans certains cas, les supraconducteurs peuvent même être *suspendus* en l'air, sous un aimant. Des atomes isolés possédant un moment magnétique sont également des diamagnétiques ; nous les faisons léviter ainsi de manière routinière, et ils ont également été photographiés dans cet état.

Réf. 118

Réf. 115

Réf. 119

Des neutrons isolés, qui possèdent un moment magnétique dipolaire, ont aussi été maintenus dans des bouteilles magnétiques de cette manière, jusqu'à ce qu'ils se désintègrent. Récemment, des scientifiques ont fait léviter des morceaux de bois, du plastique, des fraises, des gouttelettes d'eau, des gouttelettes d'hélium liquide de 2 cm, des sauterelles, des poissons et des grenouilles (tous en vie et sans subir la moindre dou-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

leur) de cette manière. Ils sont tous constitués, comme les êtres humains, de matériau
Réf. 120 diamagnétique. Les hommes eux-mêmes n'ont pas encore été mis en lévitation, mais cet exploit est planifié et les efforts pour y parvenir redoublent.

Les diamagnétiques lévitent si $\nabla B^2 > 2\mu_0 \rho g/\chi$, où ρ est la masse volumique de l'objet
Défi 175 pe et $\chi = 1 - \mu/\mu_0$ sa susceptibilité magnétique. Puisque χ est typiquement de 10^{-5} environ et ρ de l'ordre de 1 000 kg/m^3, des gradients de champ d'environ 1 000 T^2/m sont nécessaires. Autrement dit, la lévitation requiert des variations de champ de 10 T sur 10 cm, ce qui est de nos jours courant pour les aimants de laboratoire à champ puissant.

Finalement, les champs électriques ou magnétiques *variables dans le temps*, par exemple les champs périodiques, peuvent engendrer la lévitation de plusieurs manières
Réf. 113 distinctes sans aucune consommation d'énergie. C'est une des méthodes employées dans l'orientation magnétique des pompes à vide turbomoléculaires. Dorénavant, des particules chargées seules, telles que des ions et des électrons, sont également mises quo-
Réf. 113 tidiennement en lévitation à l'aide de pièges de Paul et de pièges de Penning. L'analogie mécanique est indiquée sur la Figure 81.

Réf. 121 La Figure 82 montre un jouet qui vous permet personnellement de faire léviter une toupie en l'air au-dessus d'un aimant en anneau. C'est une démonstration plutôt impressionnante de la lévitation pour quiconque l'observe. Il n'est pas difficile de construire
Réf. 122 soi-même un tel dispositif.

Nous pouvons même faire léviter des électrons libres, en les laissant flotter au-dessus de la surface de l'hélium fluide. En 1995, pendant la période la plus exaltante de la science
Réf. 123 de la lévitation, Stephen Haley a prédit que la suspension en hauteur de petites particules magnétiques au-dessus d'un anneau supraconducteur devrait être quantifiée. Cependant, cette prédiction n'a pas encore été vérifiée par l'expérience.

Afin d'être exhaustif, nous mentionnons que les forces nucléaires ne peuvent pas être utilisées pour la lévitation dans la vie courante, puisque leur domaine d'action est res-
Page ?? treint à quelques femtomètres. Cependant, nous verrons plus tard que la matière à la surface du Soleil est entravée dans sa chute vers le cœur par ces interactions ; nous pourrions ainsi dire qu'elle est vraiment mise en lévitation par des interactions nucléaires.

Matière, lévitation et effets électromagnétiques

La lévitation employée par les prestidigitateurs tombe principalement dans une autre catégorie. Lorsque David Copperfield, un magicien qui faisait des spectacles devant la génération MTV à la fin du vingtième siècle, « vole » au cours de ses démonstrations, il le fait parce qu'il est suspendu à de minces fils de pêche rendus invisibles par des arran-
Défi 176 s gements astucieux de l'éclairage. (Comment pouvons-nous le vérifier ?) En fait, si nous voulons être précis, nous devrions considérer les fils de pêche, les sacs en plastique ainsi que chaque table et chaise comme des dispositifs de lévitation. (Les journalistes de la presse à sensation les appelleraient même des dispositifs d'« anti-gravité ».) Contrairement à notre première impression, un objet suspendu ou allongé n'est pas réellement en contact avec l'objet qui le maintient, si nous scrutons attentivement les points de contact avec un microscope*. Nous en saurons plus à ce propos dans la partie quantique de notre excursion.

* Ce problème est loin d'être simple : laquelle des méthodes de lévitation décrites ci-dessus est-elle utilisée
Défi 177 pe par les tables ou les chaises ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Mais si c'est le cas, pourquoi ne tombons-nous pas à travers une table ou à travers le plancher ? Nous avons commencé l'étude de la mécanique en stipulant qu'une propriété clé de la matière est sa *solidité*, c'est-à-dire l'impossibilité d'avoir plus d'un corps au même endroit en même temps. Mais quelle est l'origine de la solidité ? À nouveau, nous pourrons répondre à cette question seulement dans la partie quantique de notre prochaine aventure, mais nous pouvons d'ores et déjà en rassembler les premiers indices.

Page ??

La solidité est due à l'électricité. De nombreuses expériences indiquent que la matière est constituée de particules chargées. En fait, la matière peut être déplacée et influencée par des champs électromagnétiques de plusieurs façons différentes. Au fil des ans, les spécialistes de la matière ont élaboré une longue liste de tels effets, lesquels sont tous fondés sur l'existence de composants chargés. Pouvez-vous en découvrir ou en imaginer un nouveau ? Par exemple, la charge électrique peut-elle modifier la couleur des objets ?

Réf. 124

Défi 178 r

TABLEAU 14 Sélection de propriétés matérielles reliées à l'électromagnétisme, révélant entre autres le rôle qu'il joue dans la composition de la matière et, à cette occasion, bref survol de la physique atomique, de l'état solide, des fluides et du commerce.

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
rayonnement thermique ou rayonnement de chaleur ou incandescence	chaque objet	rayonnement dépendant de la température émise par toute quantité macroscopique de matière
Interactions avec les charges et les courants		
électrification	distinction entre les métaux et les isolants	chargement spontané
électricité statique	verre frotté sur la fourrure d'un chat	chargement par frottement
lumière barométrique	mercure glissant le long du verre	décharge du gaz due à l'électricité statique Réf. 125
isolation	air	aucune circulation de courant en deçà d'une différence critique de tension
semi-conductivité	diamant, silicium ou arséniure de gallium	circulation de courant uniquement lorsque le matériau est impur (« dopé »)
conductivité	cuivre, métaux	le courant circule facilement
supraconductivité	niobium	le courant circule sans aucune résistance
ionisation	flammes du feu	le courant circule facilement
localisation (faible, d'Anderson)	solides désordonnés	résistance des solides désordonnés
résistivité, effet Joule	graphite	réchauffement dû à la circulation du courant
effets thermoélectriques : effet Peltier, effet Seebeck, effet Thomson	ZnSb, PbTe, PbSe, BiSeTe, Bi_2Te_3, etc.	refroidissement dû à la circulation du courant, circulation du courant dû à une différence ou à des gradients de température
effet acoustoélectrique	CdS	génération de son par des courants et vice versa

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Propriété	Exemple	Définition
magnétorésistance	fer, multicouches métalliques	variations de la résistance avec le champ magnétique appliqué Réf. 126
recombinaison	alarmes d'incendie	des porteurs de charge se combinent pour produire des atomes ou des molécules neutres
annihilation	tomographie par émission de positrons	particule et antiparticule, ex. électron et positron, disparaissent en photons
effet Penning	Ne, Ar	ionisation par le biais de collisions avec des atomes métastables
effet Richardson, émission thermique	BaO_2, W, Mo, utilisé dans les télés et les microscopes électroniques	émission d'électrons à partir des métaux chauds
effet de peau	Cu	forte densité de courant en surface des conducteurs
effet de pincement	InSb, plasmas	forte densité de courant à l'intérieur des conducteurs
effet Josephson	Nb-Oxyde-Nb	un passage de courant circule à travers un isolant placé entre deux supraconducteurs
effet Sasaki–Shibuya	n-Ge, n-Si	anisotropie de la conductivité due à l'application d'un champ électrique
magnétisme commutable	InAs :Mn	aimantation commutable en fonction de la tension Réf. 127
Interactions avec les champs magnétiques		
effet Hall	silicium, utilisé pour les mesures de champ magnétique	tension perpendiculaire au courant dans un champ magnétique appliqué
effet Zeeman	Cd	modification de la fréquence d'émission par le champ magnétique
effet Paschen–Back	gaz atomiques	modification de la fréquence d'émission dans des champs magnétiques puissants
ferromagnétisme	Fe, Ni, Co, Gd	aimantation spontanée, matériau fortement attiré par des champs magnétiques
paramagnétisme	Fe, Al, Mg, Mn, Cr	aimantation induite parallèle au champ appliqué, matériau attiré par les champs magnétiques
diamagnétisme	eau, Au, graphite, NaCl	aimantation induite opposée au champ appliqué, matériau repoussé par les champs magnétiques
magnétostriction ou piézomagnétisme	CeB_6, $CePd_2Al_3$	modification de la forme ou du volume par l'application d'un champ magnétique
effet magnétoélastique	Fe, Ni	variation de l'aimantation par la tension ou la pression

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Propriété	Exemple	Définition
effet acoustomagnétique	alliages métalliques, étiquettes anti-vol	excitation d'oscillations mécaniques par le champ magnétique
effet vanne de spin	multicouches métalliques	la résistance électrique dépend de la direction du spin des électrons par rapport au champ magnétique appliqué
activité magnéto-optique ou effet Faraday ou rotation de Faraday	verre flint	l'angle de polarisation tourne avec le champ magnétique, indice de réfraction différent pour la lumière de polarisation circulaire droite et gauche, comme dans l'enregistrement magnéto-optique (MO)
dichroïsme magnétique circulaire	gaz	absorption différente pour la lumière de polarisation circulaire droite et gauche, essentiellement identique à l'effet précédent
effet Majorana	colloïdes	effet magnéto-optique particulier
effet photoélectromagnétique	InSb	le courant circule grâce à l'exposition à la lumière de semiconducteurs dans un champ magnétique
effet Voigt	vapeurs	biréfringence induite par l'application d'un champ magnétique
effet Cotton–Mouton	liquides	biréfringence induite par l'application d'un champ magnétique
effet Hanle	Hg	modification de la polarisation de la fluorescence avec le champ magnétique
effet Shubnikov–de Haas	Bi	variation périodique de la résistance par l'application d'un champ magnétique
effets thermomagnétiques : effet Ettinghausen, effet Righi–Leduc, effet Nernst, effet magnéto–Seebeck	alliages BiSb	corrélation entre la température, les champs appliqués et le courant électrique
effet Ettinghausen–Nernst	Bi	apparition du champ électrique dans des matériaux ayant des gradients de température dans des champs magnétiques
effet Hall photonique	CeF_3	l'intensité lumineuse transversale dépend du champ magnétique appliqué Réf. 128
effet magnétocalorique	gadolinium, alliages GdSiGe	le matériau se refroidit lorsque le champ magnétique est interrompu Réf. 129
résonance cyclotron	semi-conducteurs, métaux	absorption sélective d'ondes radio dans des champs magnétiques
effet magnétoacoustique	semi-conducteurs, métaux	absorption sélective d'ondes sonores dans des champs magnétiques

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Propriété	Exemple	Définition
résonance magnétique	la majorité des matériaux ; utilisé par l'imagerie en médecine pour la détermination de la structure des molécules	absorption sélective d'ondes radio dans des champs magnétiques
effet magnétorhéologique	liquides ; employé dans les suspensions des modèles haut de gamme des voitures	modification de la viscosité avec l'application d'un champ magnétique
effet Meissner	supraconducteurs de type 1 ; utilisé pour la lévitation	exclusion totale de tout champ magnétique des supraconducteurs
Interactions avec les champs électriques		
polarisabilité	toute la matière	modification de la polarisation avec le champ électrique appliqué
ionisation, émission de champ, effet Schottky	toute la matière, télé	des charges sont extraites sous des champs puissants
paraélectricité	$BaTiO_3$	l'application d'un champ entraîne une polarisation dans la même direction
diélectricité	eau	dans la direction opposée
ferroélectricité	$BaTiO_3$	polarisation spontanée en dessous d'une température critique
piézoélectricité	l'allume-gaz à quartz utilisé dans la cuisine, os humains	une polarisation apparaît avec la tension, la contrainte ou la pression
électrostriction	éponges de platine dans des acides	modification de la forme avec la tension appliquée Réf. 130
pyroélectricité	$CsNO_3$, tourmaline, cristaux ayant des axes polaires ; utilisé pour la détection infrarouge	le changement de température engendre une séparation des charges
électro-osmose ou effet électrocinétique	de nombreux liquides ioniques	le liquide se déplace sous l'influence d'un champ électrique Réf. 131
électromouillage	solutions salées sur de l'or	le mouillage de surface dépend de la tension appliquée
action électrolytique	acide sulfurique	transport de charges à travers un liquide
effet des cristaux liquides	affichage des montres	les molécules tournent avec le champ électrique appliqué
action électro-optique : effet Kerr, effet Pockels	liquides (ex. l'huile), solides cristallins	un matériau dans un champ électrique fait tourner la polarisation lumineuse, c.-à-d. produit la biréfringence
effet Freederichsz, effet Schadt–Helfrichs	cristaux liquides nématiques	biréfringence électriquement induite

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Propriété	Exemple	Définition
effet Stark	hydrogène, mercure	changement de couleur de la lumière émise dans un champ électrique
ionisation de champ	hélium près des pointes de tungstène dans un microscope ionique à émission de champ	ionisation des atomes du gaz dans des champs électriques puissants
effet Zener	Si	transfert d'énergie nulle des électrons dans la bande de conduction sous l'action de champs puissants
évaporation de champ	W	évaporation par l'application de champs électriques puissants
Interactions avec la lumière		
absorption	charbon, graphite	transformation de la lumière en chaleur ou d'autres formes d'énergie (lesquelles ?) Défi 179 s
noirceur	charbon, graphite	absorption complète dans le domaine visible
couleur, éclat métallique	rubis	absorption dépendant de la fréquence lumineuse
photostriction	PbLaZrTi	piézoélectricité induite par la lumière
photographie	AgBr, AgI	la lumière précipite l'argent métallique
photoélectricité, effet photo	Cs	des courants circulent dans le vide par irradiation lumineuse
effet photoélectrique interne	jonction p–n Si, cellules photovoltaïques	production d'une tension et d'une circulation de courant par l'exposition à la lumière
effet d'entraînement par photon	p-Ge	courant induit par la quantité de mouvement des photons
émissivité	tous les corps	aptitude à émettre de la lumière
transparence	verre, quartz, diamant	faible réflexion, faible absorption, faible diffusion
réflectivité	métaux	la lumière rebondit sur la surface
polarisation	feuilles de polymère tirées	la transmission de la lumière dépend de l'angle de polarisation
action optique	sucre dissous dans l'eau, quartz	rotation de la polarisation
biréfringence	calcite, cornée	l'indice de réfraction dépend de la direction de polarisation, les rayons lumineux sont séparés en deux faisceaux
dichroïsme	acides aminés, andalousite	l'absorption dépend de la polarisation circulaire
anisotropie optiquement induite, effet Weigert	AgCl	biréfringence et dichroïsme optiquement induits

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Propriété	Exemple	Définition
génération de seconde harmonique	$LiNbO_3$, KPO_4	lumière partiellement transformée en une fréquence double
luminescence : terme général opposé à l'incandescence	GaAs, télé	émission de lumière froide
fluorescence	CaF_2, production de rayons X, conduits de lumière, tubes cathodiques	émission de lumière pendant et après l'absorption de lumière ou d'une autre source d'énergie
phosphorescence	$TbCl_3$	émission de lumière due à un apport d'énergie lumineuse, électrique ou chimique, persistant *longtemps après* le stimulus
électroluminescence	ZnS	émission de lumière due à un champ électrique alternatif
photoluminescence	ZnS : Cu, $SrAlO_4$: Eu, Dy, hyamine	émission de lumière déclenchée par la lumière UV ; utilisée dans la signalisation de sécurité
chimiluminescence	H_2O_2, ester phenyl oxalate, teinture	émission de lumière froide utilisée dans les tubes fluorescents pour les plongeurs et pour se divertir
bioluminescence	ver luisant, poisson abyssal	émission de lumière froide chez les animaux
triboluminescence	sucre	émission de lumière pendant le frottement ou la cassure
thermoluminescence	quartz, feldspath	émission de lumière pendant le réchauffement, utilisée par exemple pour la datation archéologique des poteries Réf. 132
bremsstrahlung ou rayonnement continu de freinage ou rayonnement blanc	production de rayons X	émission de rayonnement par des électrons en ralentissement rapide
effet Compton	mesure de la quantité de mouvement	variation de la longueur d'onde de la lumière, en particulier des rayons gamma et X, entrant en collision avec la matière
effet Čerenkov	eau, détecteurs de particules, polymères	émission de lumière dans un milieu due aux particules, émises par exemple par des processus radioactifs, se déplaçant plus vite que la vitesse de la lumière dans ce milieu
rayonnement de transition	tout matériau	émission de lumière due à des particules relativistes passant d'un milieu à un autre, ayant un indice de réfraction différent
électrochromicité	wolframates	modification de couleur avec le champ électrique appliqué

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Propriété	Exemple	Définition
diffusion	gaz, liquides	la lumière change de direction de propagation
diffusion de Mie	poussières dans les gaz	la lumière change de direction de propagation
diffusion de Rayleigh	ciel	la lumière change de direction de propagation, le ciel est bleu
effet Raman ou effet Smekal–Raman	gaz moléculaires	variation de fréquence de la lumière diffusée
action du laser, superradiation	bière, rubis, He–Ne	émission de rayonnement stimulé
sonoluminescence	air dans l'eau	émission de lumière pendant la cavitation
gravitoluminescence	n'existe pas, pourquoi ? Défi 180 s	
miroir commutable	LaH	une tension contrôlée permet de passer de la réflexion à la transparence Réf. 133
effet radiomètre	moulins à vent bicolores	le rayonnement fait tourner le moulin (voyez la page 94)
pression lumineuse	*idem*	le rayonnement fait tourner directement le moulin
effet de voile solaire	futurs satellites	mouvement engendré par le vent solaire
effet acousto-optique	$LiNbO_3$	diffraction de la lumière par le son dans des matériaux transparents
matériaux photoréfractifs	$LiNbO_3$, GaAs, InP	l'irradiation lumineuse modifie l'indice de réfraction
effet Auger	spectroscopie Auger des électrons	émission d'électrons due à une réorganisation atomique après une ionisation par rayons X
réflexion de Bragg	détermination de la structure d'un cristal	diffraction des rayons X par des plans atomiques
effet Mößbauer	Fe ; utilisé en spectroscopie	absorption résonante sans recul du rayonnement gamma
création de paire	Pb	transformation d'un photon en une paire particule–antiparticule chargée
photoconductivité	Se, CdS	changement de la résistivité avec l'irradiation lumineuse
effet optoacoustique, effet photoacoustique	gaz, solides	création de son provoquée par l'absorption de lumière pulsée
effet optogalvanique	plasmas	modification du courant de décharge due à l'irradiation lumineuse
effets optiques non linéaires : amplification paramétrique, mélange de fréquence, absorption saturable, génération de n-ième harmonique, effet Kerr optique, etc.		
action de miroir à conjugaison de phase	gaz	réflexion de la lumière avec une phase opposée

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
Propriétés matérielles		
solidité, impénétrabilité	sols, piliers, cordes, seaux	un objet, au plus, par emplacement à un instant donné
Interactions avec le vide		
effet Casimir	métaux	attraction des corps conducteurs non chargés

Toutes les propriétés matérielles présentées dans la liste peuvent être influencées par des champs électriques ou magnétiques, ou dépendent directement d'eux. Cela révèle que toutes ces propriétés matérielles sont de nature électromagnétique. Autrement dit, les charges et leurs interactions constituent une partie essentielle et fondamentale de la structure des objets. Le tableau montre tant de propriétés électromagnétiques différentes que le mouvement des charges à l'intérieur de chaque matériau doit, en vérité, être complexe. La plupart des effets relèvent du domaine de la physique de l'état solide*, des fluides et de la physique des plasmas.

La physique de l'état solide est de loin la branche la plus importante de la physique, lorsque nous la mesurons par l'impact qu'elle a sur la société. Pratiquement tous les effets ont des applications dans des produits techniques, et permettent d'employer de nombreuses personnes. Pouvez-vous citer un produit ou une application commerciale pour n'importe quel effet choisi au hasard dans ce tableau ?

Défi 181 e

Toutefois, dans notre ascension montagneuse nous n'analyserons qu'un exemple tiré de la liste précédente : le rayonnement thermique, l'émission de lumière par des corps chauds.

Le théorème d'Earnshaw sur l'impossibilité de l'existence d'un équilibre stable pour des particules chargées au repos implique que les charges situées à l'intérieur de la matière doivent vraiment être *en mouvement*. Pour chaque particule chargée en mouvement, les équations de Maxwell pour le champ électromagnétique montrent qu'elle diffuse de l'énergie sous forme de rayonnement en émettant des ondes électromagnétiques. En bref, la mécanique classique prédit ainsi que la matière doit rayonner de l'énergie électromagnétique.

De manière intéressante, chacun sait par expérience que c'est réellement le cas. Les corps chauds brillent en fonction de leur température, le fonctionnement des ampoules lumineuses démontre ainsi que les métaux sont constitués de particules chargées. L'*incandescence*, comme nous l'appelons, requiert des charges. En vérité, *tout* corps émet du rayonnement, même à température ambiante. Ce rayonnement est appelé *rayonnement thermique* ; à température ambiante il se situe dans l'infrarouge. Son intensité est plutôt faible dans la vie courante, elle est donnée par l'expression générale suivante

Réf. 134

* L'ouvrage introductif, probablement le meilleur et certainement le plus divertissant, en langue anglaise sur le sujet est celui de NEIL ASHCROFT & DAVID MERMIN, *Solid State Physics*, Holt Rinehart & Winston, 1976.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

$$I(T) = f\,T^4\,\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} \quad \text{ou} \quad I(T) = f\,\sigma T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = 56{,}7\,\mathrm{nW/K^4m^2}\,, \qquad (70)$$

où f représente un facteur dépendant du matériau, de la forme et de la température, ayant une valeur située entre zéro et un, et est appelé l'*émissivité*. La constante σ est appelée la *constante de rayonnement de corps noir de Stefan–Boltzmann* ou *constante de rayonnement de corps noir*. Un corps dont l'émissivité est donnée par le cas parfait $f = 1$ est appelé un *corps noir*, parce qu'à température ambiante un tel corps possède également un coefficient d'absorption idéal, et paraît donc noir. (Pouvez-vous deviner pourquoi ?) Le rayonnement de chaleur qu'un tel corps émet est appelé *rayonnement de corps noir*.

Défi 182 s

Par ailleurs, lequel de ces objets rayonne-t-il le plus d'énergie : un corps humain ou un échantillon représentatif de même masse du Soleil ? Devinez d'abord !

Réf. 135

Défi 183 s

Curiosités et défis amusants sur les effets électromagnétiques

« À l'intérieur d'un conducteur, il n'y a pas de champ électrique. » Cette affirmation est fréquemment formulée. En fait, cette vérité n'est pas aussi évidente. Premièrement, un champ *statique* ou une charge *statique* à la surface d'un corps métallique n'influence pas les champs et les charges situés à l'intérieur. Une surface métallique fermée forme donc un bouclier vis-à-vis d'un champ électrique. Pouvez-vous en fournir une explication ? En fait, une mince couche métallique n'est pas nécessaire pour reproduire cet effet, une cage est suffisante. Nous parlons alors de *cage de Faraday*.

Défi 184 s

Le détail de ce mécanisme vous permet de répondre à la question suivante : les cages de Faraday pour la gravité existent-elles ? Pourquoi ?

Pour des champs externes ou des charges *mobiles*, ce problème est plus complexe. Les champs dus à des charges accélérées – des champs rayonnants – décroissent exponentiellement à travers un bouclier. Les champs engendrés par des charges en mouvement à vitesse constante sont fortement diminués, mais ne disparaissent pas. La réduction dépend de l'épaisseur et de la résistivité de la clôture métallique employée. Pour des feuillets métalliques, la suppression du champ est très forte, elle n'est pas nécessairement forte pour du plastique pulvérisé de métal. Un tel dispositif ne résisterait pas forcément à un coup de foudre proche.

Réf. 90

En pratique, il n'y a aucun danger si la foudre frappe un avion ou une voiture, à condition qu'ils soient en métal. (Il y a un film sur Internet qui montre une voiture frappée par la foudre, son conducteur ne s'en aperçoit même pas.) Cependant, si votre véhicule est touché par un éclair par temps sec, vous devrez patienter quelques minutes avant d'en sortir. Pouvez-vous imaginer pourquoi ?

Les cages de Faraday fonctionnent aussi dans l'autre sens. Des champs électriques variant (lentement) situés à l'intérieur d'une cage de Faraday ne sont pas détectés à l'extérieur. Pour cette raison, les radios, les téléphones portables et les ordinateurs sont entourés par des boîtes faites de métal ou de plastique pulvérisé de métal. Le métal permet de restreindre au minimum ce que nous appelons le *brouillard électromagnétique*.

Il existe donc trois bonnes raisons d'isoler les appareils électriques par un bouclier relié à la terre : pour protéger l'appareil des champs extérieurs, pour protéger les gens et les autres machines du brouillard électromagnétique et pour protéger les utilisateurs de la tension du réseau électrique qui serait accidentellement mise en contact dans la

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

boîte (par exemple, lorsque l'isolation est défectueuse). Dans des expériences de haute précision, ces trois fonctions peuvent être mises en œuvre par trois cages distinctes.

Pour des champs purement magnétiques, la situation est plus complexe. Il est plutôt difficile de protéger l'intérieur d'une machine des champs magnétiques externes. Comment le feriez-vous ? En pratique, nous utilisons souvent des couches de *mu-métal* ; pouvez-vous deviner comment ce matériau agit ? Défi 185 pe

* *

Des chercheurs tentent de déceler la dégénérescence des dents à l'aide de courants électriques, en tirant profit du fait que les dents saines sont de mauvais conducteurs, contrairement aux dents abîmées. Comment tireriez-vous profit de cet effet dans cette situation ? (Par ailleurs, il se pourrait que la technique absolument sans rapport de l'imagerie par des ondes térahertz puisse conduire à des résultats similaires.) Réf. 91 Défi 186 pe

* *

Les os humains sont piézoélectriques : ils produisent des signaux électriques lorsqu'ils subissent une contrainte. Lorsque nous nous déplaçons et lorsque nous grandissons, les signaux électriques sont utilisés par le corps pour consolider les os dans les régions qui en ont besoin. La piézoélectricité du squelette contrôle et guide ainsi sa croissance. Cette relation est également mise à profit pour permettre aux os fracturés de se cicatriser plus rapidement : en appliquant des champs magnétiques *pulsés* sur un os fracturé, la cicatrisation est stimulée et accélérée. (Les champs magnétiques statiques ne fonctionnent évidemment pas dans cette situation.) Les dents également sont piézoélectriques, et cet effet joue un rôle dans leur croissance.

* *

Nous pouvons nous procurer dans le commerce des appareils piézoélectriques – similaires à un allume-gaz – qui sont appliqués sur les piqûres de moustique et dont on prétend qu'ils réduisent les démangeaisons et même les enflures. (Certains produits s'appellent « Zanza-click » et « Skeeter-click ».) Cela peut-il être vrai ? Défi 187 e

* *

Une équipe de cameramen située au milieu du Sahara a utilisé des équipements électriques alimentés par des batteries pour réaliser des enregistrements sonores. À chaque fois que le câble du microphone faisait quelques dizaines de mètres de long, ils entendaient aussi un bruit de fond d'alimentation électrique de 50 Hz, bien que le transformateur électrique le plus proche fût éloigné de plusieurs milliers de kilomètres. Une enquête révéla que les lignes à haute tension en Europe perdent une quantité considérable de puissance par rayonnement. Ces ondes de 50 Hz sont réfléchies par l'ionosphère autour de la Terre et peuvent donc perturber des enregistrements ayant lieu au milieu du désert. Pouvez-vous estimer si cette observation implique qu'il est dangereux de vivre directement à proximité d'une ligne à haute tension ? Défi 188 s

* *

Lorsque des tempêtes de plasma solaire sont observées sur notre étoile, les astronomes téléphonent d'abord aux compagnies électriques. Ils savent qu'à peu près 24 à 48 heures

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

plus tard les particules chargées éjectées par les tempêtes parviendront sur la Terre, faisant vaciller le champ magnétique situé en surface. Puisque le réseau électrique possède souvent des boucles fermées de plusieurs milliers de kilomètres, des courants électriques supplémentaires sont induits, lesquels peuvent faire surchauffer les transformateurs situés dans le réseau, et les faire sauter. D'autres transformateurs doivent alors prendre en charge la puissance supplémentaire, ce qui peut provoquer leur surchauffe et ainsi de suite. À plusieurs reprises par le passé, des millions de gens se sont retrouvés sans courant électrique à cause des tempêtes solaires. Aujourd'hui, les compagnies d'électricité esquivent ce problème en déconnectant les diverses sections du réseau, en évitant d'avoir de vastes boucles, en réduisant la tension domestique pour éviter la saturation des transformateurs, et en rejetant tout transfert de charge des circuits défaillants vers les autres.

* *

Si le champ électrique est décrit comme une somme de composantes de différentes fréquences, que nous dénommons les *composantes de Fourier*, les amplitudes sont données
Réf. 93 par

$$\hat{\boldsymbol{E}}(k,t) = \frac{1}{(2\pi)^3/2} \int \boldsymbol{E}(x,t) \mathrm{e}^{-i\boldsymbol{k}x} \,\mathrm{d}^3x \tag{71}$$

et il en est de même pour le champ magnétique. Il apparaît alors qu'une quantité N invariante sous la transformation de Lorentz, décrivant l'énergie par fréquence circulaire ω, peut être définie :

$$N = \frac{1}{8\pi} \int \frac{|\boldsymbol{E}(k,t)|^2 + |\boldsymbol{B}(k,t)|^2}{c|\boldsymbol{k}|} \,\mathrm{d}^3k \,. \tag{72}$$

Défi 189 s Pouvez-vous deviner ce que N représente physiquement ? (Indice : pensez à la théorie quantique.)

* *

Faraday découvrit comment convertir le magnétisme en électricité, en sachant que l'électricité pouvait être transformée en magnétisme. (Ce problème est plus subtil. La loi de Faraday n'est pas le doublon de celle d'Ampère, puisque cela impliquerait l'utilisation de monopôles magnétiques ; elle n'est pas non plus la réciproque, puisqu'elle entraînerait alors l'existence du courant de déplacement. Mais il cherchait une relation et il trouva une manière de relier les deux observations – de façon innovante, comme cela nous est apparu.) Faraday découvrit également comment transformer l'électricité en lumière et comment l'utiliser en chimie. Il tenta alors de convertir la gravitation en électricité. Mais
Défi 190 pe il n'y parvint pas. Pourquoi ?

* *

À haute altitude au-dessus de la Terre, les gaz sont complètement ionisés, aucun atome n'est neutre. Nous parlons alors de l'*ionosphère*, car l'espace est rempli d'ions positifs et d'électrons libres. Bien que ces deux charges apparaissent exactement dans la même pro-
Défi 191 s portion, un satellite qui traverse l'ionosphère acquiert une charge négative. Pourquoi ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Comment ce chargement s'interrompt-il ?

* *

Un condensateur de capacité C est chargé avec une tension U. L'énergie électrostatique emmagasinée est $E = CU^2/2$. Le condensateur est alors débranché de l'alimentation électrique et est relié à un condensateur vide de même capacité. Après un certain temps, la tension chute évidemment à $U/2$. Toutefois, l'énergie stockée est maintenant de $C(U/2)^2$, ce qui est la moitié de la valeur d'origine. Où l'énergie est-elle partie ?

Défi 192 s

* *

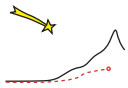
La force maximale dans la nature restreint la charge maximale qu'un trou noir peut emporter. Pouvez-vous découvrir cette relation ?

Défi 193 pe

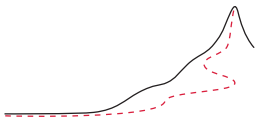
* *

Comment pouvez-vous donner à quelqu'un un choc électrique en utilisant une pile de 4,5 V et du fil métallique ?

Défi 194 s



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 6

TOUR D'HORIZON SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE ET SES LIMITES

Toute l'électrodynamique classique peut être résumée en trois principes :

▷ Les charges électriques exercent des forces sur les autres charges.
▷ Les charges électriques sont conservées.
▷ Les charges, comme toute la matière, se déplacent plus lentement que la lumière.

À partir de ces principes, nous pouvons retrouver toute l'électrodynamique. Celle-ci est ainsi bâtie sur la définition de la charge, sur la conservation de la charge et sur l'invariance de la vitesse de la lumière. En particulier, nous pouvons en déduire les propositions fondamentales qui suivent.

Réf. 22

— Le champ électromagnétique est une observable physique, comme le montrent par exemple les boussoles.
— Les sources du champ sont les charges (en mouvement), comme l'indiquent l'ambre, l'aimant naturel ou les télécommandes.
— Le champ électromagnétique modifie le mouvement des objets électriquement chargés par le biais de l'expression de Lorentz, comme le démontrent les générateurs électriques.
— Le champ peut exister dans l'espace vide et se déplacer dans celui-ci comme une onde, comme le révèlent, par exemple, les étoiles.
— Le champ se comporte comme une quantité continue et est décrit par les équations d'évolution de Maxwell, comme en témoignent, par exemple, les téléphones portables et les brosses à dents électriques.

Comme d'habitude, le mouvement des sources et du champ est réversible, continu, conservé et déterministe. Cependant, il y a pas mal de grain à moudre en perspective car, bien que cette description soit correcte dans la vie courante, au cours du reste de notre ascension montagneuse nous découvrirons que le dernier point doit être inexact. Un exemple simple le montre.

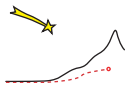
À une température de zéro kelvin, quand la matière ne rayonne plus thermiquement, nous notons la présence d'une situation paradoxale où les charges situées dans la matière ne peuvent pas bouger, puisque nous n'observons aucun rayonnement émis, mais elles ne peuvent pas non plus être au repos, à cause du théorème d'Earnshaw. En bref, la simple existence de la matière – avec ses valeurs discrètes de charge – démontre que l'électrodynamique classique est fausse.

Page 138

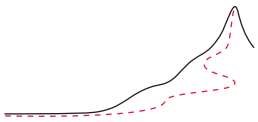
En réalité, la vue d'ensemble des propriétés matérielles du Tableau 14 aboutit à la même conclusion de manière encore plus prononcée. L'électrodynamique classique peut décrire un grand nombre des effets listés, *mais elle ne peut pas expliquer l'origine de l'un*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

quelconque d'entre eux. Même si quelques-uns des effets seront étudiés au cours de notre promenade – ils ne sont pas essentiels pour notre aventure –, les concepts généraux nécessaires pour leur description constitueront le sujet de la prochaine partie de cette ascension montagneuse, celle sur la théorie quantique.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 7

LA PHYSIQUE CLASSIQUE DANS UNE COQUILLE DE NOIX

La description de la relativité générale et de l'électrodynamique classique achève notre déambulation à travers les sentiers de la physique classique. Afin de bien percevoir ses limitations, nous allons synthétiser ce que nous avons découvert. Dans la nature, nous avons appris à distinguer et à caractériser les objets, le rayonnement et l'espace-temps. Tous les trois peuvent bouger. Dans tout mouvement, nous discernons les propriétés intrinsèques, figées de celles relatives à un état variable. Tout mouvement se produit de telle sorte que le changement soit minimal.

Dans notre recherche de tous les aspects *figés et intrinsèques* des objets, nous avons remarqué que tous les objets suffisamment petits, ou les particules, sont entièrement décrits par leur masse et leur charge électrique. Il n'y a pas de charge magnétique. La masse et la charge électrique sont donc les uniques propriétés localisées intrinsèques des objets classiques, de la vie de tous les jours. La masse et la charge électrique sont toutes les deux définies par les accélérations qu'elles produisent autour d'elles. Ces deux quantités étant conservées, elles peuvent donc être additionnées. La masse, contrairement à la charge, est toujours positive. La masse décrit l'interaction des objets avec leur environnement, la charge l'interaction avec le rayonnement.

Tous les aspects *variables* des objets, c'est-à-dire leur état, peuvent être décrits en utilisant la quantité de mouvement et la position, ainsi que le moment cinétique et l'orientation. Tous peuvent varier continûment en grandeur et en direction. Par conséquent, l'ensemble de tous les états possibles forme un espace, dit *espace des phases*. L'état des objets étendus est donné par les états de toutes leurs particules constituantes. Ces particules composent tous les objets et interagissent, d'une façon ou d'une autre, de manière électromagnétique.

L'état d'une particule dépend de l'observateur. La notion d'état est utile pour évaluer le changement qui survient dans le mouvement. Pour une particule donnée, le changement est indépendant de l'observateur, mais les états ne le sont pas. Les états relevés par différents observateurs sont reliés : ces relations sont appelées les « lois » du mouvement. Par exemple, pour des instants différents, nous les appelons *équations d'évolution* ; pour des endroits et des orientations distincts, nous les appelons *relations de transformation* ; et pour des jauges différentes, nous les appelons *transformations de jauge*. Toutes ces lois peuvent être concentrées dans le principe de moindre action.

Nous observons également le mouvement d'une entité dénuée de masse : le *rayonnement*. Les types de rayonnements ordinaires, tels que la lumière, les ondes radio et leurs formes apparentées, sont des ondes électromagnétiques qui se propagent. Ils sont décrits par les mêmes équations que celles qui décrivent l'interaction des objets chargés

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ou magnétiques. La vitesse des entités sans masse est la vitesse maximale possible dans la nature ; elle est la même pour tous les observateurs. Les *propriétés intrinsèques* du rayonnement sont sa relation de dispersion et sa relation énergie–moment cinétique. L'*état* du rayonnement est décrit par l'intensité de son champ électromagnétique, sa phase, sa polarisation et son couplage avec la matière. Le mouvement du rayonnement décrit le mouvement des images.

L'*environnement* spatio-temporel est décrit par les coordonnées d'espace et de temps. L'espace-temps peut également se mouvoir en modifiant sa courbure. Les propriétés intrinsèques de l'espace-temps sont le nombre de dimensions, sa signature et sa topologie. L'état est donné par la métrique, qui définit les distances et donc la distorsion locale. La distorsion peut osciller et se propager, de telle sorte qu'un espace vide peut se déplacer comme une onde.

Notre environnement possède un âge fini. Il témoigne d'une longue histoire et, aux grandes échelles, toute matière dans l'Univers s'éloigne du reste de la matière. La topologie à très grande échelle de notre environnement est absconse, tout comme ce qui se passe près de ses frontières spatiales et temporelles demeure impénétrable.

Le *mouvement* découle d'une règle élémentaire : le changement est toujours aussi minime que possible. Cela s'applique à la matière, au rayonnement et à l'espace-temps. Toute énergie se déplace de la manière dictée par l'espace-temps, et l'espace se meut selon ce que l'énergie lui dicte. Cette relation décrit le mouvement des étoiles, des pierres lancées en l'air, des rayons lumineux et des marées. Le repos et la chute libre sont une seule et même chose, et la gravité est l'espace-temps courbe. La masse brise la symétrie conforme et donc distingue l'espace du temps.

La limite supérieure de la vitesse de l'énergie et de la masse est une constante universelle c, et la limite supérieure de la variation de l'énergie par unité de temps est une constante universelle $c^5/4G$. La valeur de la vitesse c est atteinte par le mouvement des particules sans masse. Elle relie également l'espace au temps. La valeur de la puissance $c^5/4G$ est réalisée par les horizons. Nous les rencontrons autour des trous noirs et à la frontière du cosmos. Cette valeur relie aussi la courbure de l'espace-temps au flux d'énergie, et décrit ainsi l'élasticité de l'espace-temps.

Deux objets ne peuvent pas se trouver au même endroit en même temps. C'est la première affirmation à laquelle les hommes ont été confrontés à propos de l'électromagnétisme. Des recherches plus précises montrent que la charge électrique accélère d'autres charges, que celle-ci est nécessaire pour définir les intervalles de longueur et de temps, et que les charges représentent la source des champs électromagnétiques. La lumière aussi constitue un tel champ. La lumière voyage à la vitesse maximale possible. Contrairement aux objets, la lumière peut s'interpénétrer. En résumé, nous avons appris que des deux types élémentaires de mouvement des objets, à savoir le mouvement causé par la gravité – ou par la courbure de l'espace-temps – et le mouvement engendré par le champ électromagnétique, seul le dernier est authentique.

Par-dessus tout, la physique classique nous a montré que le mouvement, qu'il soit en translation ou en rotation, qu'il concerne celui de la matière, du rayonnement ou de l'espace-temps, est conservé. Le mouvement est continu. Plus que cela, le mouvement est analogue à une substance continue : il n'est jamais détruit, jamais créé, mais toujours redistribué. À cause de la conservation, tout mouvement, celui des objets, des images et de l'espace vide, est prévisible et réversible. Grâce à la conservation du mouvement, le

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

temps et l'espace peuvent être définis. De surcroît, nous avons découvert que le mouvement classique vérifie également la symétrie droite–gauche. La physique classique nous a révélé que le mouvement est prévisible : il n'y a *pas* de surprises dans la nature.

L'avenir de la planète Terre

La nature ne révèle peut-être pas de surprises, mais elle suscite toujours de nombreuses frayeurs. Le 8 mars 2002, un corps d'une taille de 100 m s'est approché très près de la Terre. Il a frôlé notre planète à une distance de 450 000 km seulement. Si l'impact avait eu lieu, il aurait pulvérisé une région de la taille de Londres. Quelques mois auparavant, un corps de 300 m manqua la Terre à 800 000 km près. En 1994, un corps s'est approché à 100 000 km de notre planète, mais le record s'est produit le 2 mars 2009 : 2009 DD_{45} est un petit astéroïde qui est passé à proximité de la Terre à une altitude de 63 500 km seulement*. Nous pouvons prévoir plusieurs autres événements par la physique classique, comme indiqué dans le Tableau 15. Nombre d'entre eux sont des problèmes que l'humanité devra affronter dans un avenir lointain, mais certains, comme les éruptions volcaniques ou les impacts d'astéroïdes, peuvent survenir à n'importe quel moment. Ils font tous l'objet de recherches actives.

Réf. 139

TABLEAU 15 Exemples de mouvements catastrophiques d'importance future probable.

Situation critique	Échéance en années
Fin de la physique fondamentale	env. 30 (autour de l'an 2030)
Tsunami géant provenant d'une éruption volcanique des Îles Canaries	env. 10-200
Accident majeur dû à l'utilisation de matériaux ou d'armes nucléaires	inconnue
Diminution de la couche d'ozone	env. 100
Mini âge glaciaire dû à la disparition du Gulf Stream	inconnue
Élévation du niveau des océans due au réchauffement climatique	env. 100-1 000
Fin de la physique appliquée	> 200
Explosion de volcan au Groenland, provoquant un obscurcissement prolongé du ciel	inconnue
Instabilité du manteau terrestre entraînant une intense activité volcanique	inconnue
Plusieurs pôles magnétiques nord et sud surgissent, laissant les tempêtes solaires perturber les communications radio et les télécommunications, couper les réseaux électriques, augmenter les mutations animales et désorienter les animaux migrateurs comme les baleines, les oiseaux et les tortues	env. 800
Notre nuage de gaz interstellaire se détache du Système solaire, modifiant la taille de l'héliosphère, et nous exposant ainsi de manière accrue aux champs magnétiques du Soleil et des aurores	env. 3 000

* Les pages Web sur cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Closest.html fournissent plus d'informations sur de tels événements.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

SITUATION CRITIQUE	ÉCHÉANCE EN ANNÉES
Inversion du champ magnétique de la Terre, impliquant la présence d'une période essentiellement sans champ magnétique, avec des niveaux accrus de rayonnement cosmique et donc plus de cancers de la peau et de fausses couches	inconnue
Appauvrissement de l'oxygène atmosphérique dû à la réduction de la couverture forestière et à la consommation exagérée de carburant	> 1 000
Prochain âge glaciaire	env. 15 000
Collision probable avec un nuage de gaz interstellaire qu'on suppose être traversé par la Terre tous les 60 millions d'années, causant peut-être des extinctions massives	env. 50 000
Explosion du volcan de Yellowstone ou d'un autre volcan géant engendrant un hiver volcanique d'un an	0 à 100 000
Dégénérescence génétique possible d'*Homo sapiens* due à une diminution du chromosome Y	env. 200 000
L'Afrique entre en collision avec l'Europe, transformant la Méditerranée en un lac qui commence à s'évaporer	autour de $3 \cdot 10^6$
Sursauts gamma provenant de l'intérieur de notre galaxie, dont les rayonnements provoquent des dommages aux nombreux êtres vivants	entre 0 et $5 \cdot 10^6$
Astéroïde heurtant la Terre, engendrant des tsunamis, des tempêtes, un assombrissement de la lumière du jour, etc.	entre 0 et $50 \cdot 10^6$
Rapprochement d'une étoile voisine, déclenchant un déluge de comètes, à travers la déstabilisation du nuage d'Oort, et mettant ainsi en péril la vie sur Terre	$> 10^6$
Le continent américain heurte l'Asie	$> 100 \cdot 10^6$
Un nuage moléculaire engloutit le Système solaire	inconnue
Instabilité du Système solaire	$> 100 \cdot 10^6$
Une faible teneur en CO_2 dans l'atmosphère stoppe la photosynthèse	$> 100 \cdot 10^6$
Collision de la Voie lactée avec un amas stellaire ou une autre galaxie	$> 150 \cdot 10^6$
Le Soleil vieillit et devient de plus en plus brûlant, faisant évaporer les océans	$> 250 \cdot 10^6$
Le niveau des océans augmente à cause du ralentissement ou de la fin de la rotation de la Terre (si elle ne s'évapore pas avant)	$> 10^9$
La température s'élève ou chute (en fonction du lieu) à cause de la fin de la rotation de la Terre	$> 10^9$
Le Soleil n'a plus de carburant, devient une géante rouge, engloutit la Terre	$5{,}0 \cdot 10^9$
Le Soleil cesse de brûler, devient une naine blanche	$5{,}2 \cdot 10^9$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

SITUATION CRITIQUE	ÉCHÉANCE EN ANNÉES
Le noyau de la Terre se solidifie, faisant disparaître le champ magnétique et donc le bouclier terrestre contre le rayonnement cosmique	$10,0 \cdot 10^9$
Une nova proche (par ex. Bételgeuse) baigne la Terre d'un rayonnement d'annihilation	inconnue
Une supernova proche (par ex. Êta Carinae) souffle le Système solaire	inconnue
Le centre galactique déstabilise le reste de la galaxie	inconnue
L'Univers s'effondre – si jamais cela se produit (regardez la page 123)	$> 20 \cdot 10^9$
La matière se désintègre en rayonnement – si jamais cela arrive (regardez l'Annexe **??**)	$> 10^{33}$
Problèmes avec les singularités nues	inconnue, controversée
Le vide devient instable	inconnue, controversée

Malgré la fascination que suscitent ces prédictions, nous laissons de côté ces problèmes littéralement phénoménaux et nous poursuivons notre aventure.

L'ESSENCE DE LA PHYSIQUE CLASSIQUE – L'INFINIMENT PETIT ET L'ABSENCE DE SURPRISES

Nous pouvons résumer la physique classique en deux propositions élémentaires : premièrement, *la physique classique est la description du mouvement qui utilise la notion de l'infiniment petit* ; deuxièmement, *la nature manque de surprises*.

Tous les concepts employés jusqu'à présent, que ce soit pour le mouvement, l'espace, le temps ou les observables, supposent que l'infiniment petit existe. La relativité restreinte, en dépit de la vitesse limite, autorise toujours l'existence de vitesses infiniment petites. La relativité générale, malgré sa limite du trou noir, permet toujours l'existence de valeurs de puissance et de force infiniment petites. De manière similaire, dans la description de l'électrodynamique et de la gravitation, les intégrales et les dérivées sont toutes les deux des notations de procédures mathématiques qui font usage d'intervalles de distance et de temps infiniment petits. Autrement dit, la description classique de la nature introduit l'infiniment petit dans la description du mouvement.

En utilisant l'infiniment petit comme instrument de recherche, la description classique du mouvement révèle que l'énergie, la quantité de mouvement, le moment cinétique et la charge sont conservés. Ils sont également conservés dans le cas de dimensions ou de durées infiniment petites. Autrement dit, il n'y a pas de surprises dans le mouvement.

L'étude minutieuse de la conservation nous a conduits à une conclusion profonde : l'exploration de l'infiniment petit indique que le mouvement est déterministe. Les surprises contrediraient le déterminisme*.

* L'absence de surprises implique aussi l'absence de miracles. La physique classique est donc en contradiction avec de nombreuses religions. En réalité, la majorité des religions argumente que l'infini est l'ingrédient

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

D'un autre côté, ce résultat laisse quelques questions sans réponse. Les relativités restreinte et générale ont toutes les deux évincé l'existence de l'infiniment grand. Il n'existe pas de force, de puissance, de taille, d'âge ou de vitesse infiniment grands. Pourquoi l'infiniment petit existerait-il, mais pas l'infiniment grand ?

En réalité, il y a encore d'autres questions ouvertes.

Pourquoi n'avons-nous pas encore atteint le sommet de la montagne ?

> « Les lois et les réalités fondamentales les plus importantes de la physique ont toutes été découvertes et elles sont maintenant si fermement établies que l'éventualité de les voir infirmées par de nouvelles découvertes est extrêmement faible... Nos découvertes ultérieures ne devraient avoir un impact que sur la sixième décimale. »
>
> Albert Michelson*.

Nous pourrions imaginer que nous connaissons dorénavant la nature, comme le pensait Albert Michelson à la fin du dix-neuvième siècle. Il proclama que l'électrodynamique et la physique galiléenne suggéraient que les lois principales de la physique étaient désormais bien connues. Cette affirmation est souvent citée comme un exemple de prédiction erronée, puisqu'elle reflète une ignorance intellectuelle incroyable sur le monde qui nous entoure. La relativité générale était encore inconnue, et la théorie quantique restait à découvrir.

À la fin du dix-neuvième siècle, les progrès de la technologie réalisés grâce à l'utilisation de l'électricité, de la chimie et de la technologie du vide ont permis de concevoir des machines et des appareils de plus en plus perfectionnés. Tous furent construits dans l'esprit de la physique classique. Entre 1890 et 1920, ces machines classiques anéantirent complètement les fondements de la physique classique. Des expériences menées avec ces dispositifs montrèrent que la matière est constituée d'atomes, que la charge électrique apparaît en quantités minimales insécables et que la nature se comporte de manière aléatoire. La nature engendre vraiment des surprises – bien que dans un sens limité, comme nous le verrons. Comme l'Empire britannique, le règne de la physique classique s'effondra. Pour le dire simplement, la physique classique ne rend pas compte de la nature aux petites échelles.

Mais même sans machines, notre physicien de l'époque victorienne aurait pu prévoir cette situation. (En réalité, de nombreux esprits plus clairvoyants le firent.) Il avait sous les yeux une contradiction entre l'électrodynamique et la nature, pour laquelle il n'avait aucune excuse. Dans notre promenade, jusqu'ici, nous avons découvert que les horloges et les mètres étalons sont nécessairement constitués de matière et fondés sur l'électromagnétisme. Mais comme nous venons de le voir, l'électrodynamique classique n'explique pas la stabilité de la matière. La matière est composée de petites particules, mais la relation entre ces particules, l'électricité et les charges élémentaires reste vague. Si nous ne

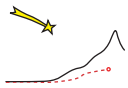
indispensable pour accomplir des miracles. La physique classique montre que ce n'est pas le cas.

* Tiré de son discours de 1894 à la cérémonie d'inauguration du laboratoire de physique Ryerson à l'université de Chicago.

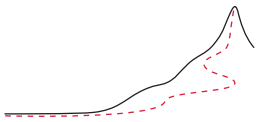
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

comprenons pas ce qu'est la matière, alors nous n'avons pas encore compris ce que sont l'espace et le temps, puisqu'ils sont définis par le truchement de dispositifs de mesure constitués de matière.

Pire, ce physicien victorien négligea une réalité fondamentale : la description classique de la nature ne nous permet pas de comprendre la *vie*. Les aptitudes qu'ont les êtres vivants – grandir, voir, entendre, sentir, penser, être en bonne santé ou malade, se reproduire et mourir – demeurent toutes inexpliquées par la physique classique. En fait, toutes ces aptitudes *contredisent* la physique classique. La compréhension de la matière et de ses interactions, y compris la vie elle-même, est par conséquent l'objectif de la prochaine partie de notre ascension de la Montagne Mouvement. Cette compréhension se tiendra aux échelles minuscules : pour comprendre la nature, nous devons étudier les particules. En réalité, la structure atomique de la matière, l'existence d'une charge minimale et l'existence d'une entropie minimale nous posent des questions sur l'existence de l'infiniment petit. Il reste un monde à explorer. Le fait de nous y consacrer nous fera rebondir de surprise en surprise. Pour bien nous y préparer, faisons d'abord une halte.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 8

L'HISTOIRE DU CERVEAU

> « Alles was überhaupt gedacht werden kann, kann klar gedacht werden*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.116

Dans notre quête de précision accrue sur la description de tous les mouvements e notre voisinage, il est temps de faire une pause. Asseyez-vous et contemplez le chemin parcouru. Dans notre promenade, qui nous a conduits à examiner la mécanique, la relativité générale et l'électrodynamique, nous avons utilisé jusqu'à présent plusieurs concepts sans les avoir définis. Par exemple, ceux d'« information », de « mémoire », de « mesure », d'« ensemble », de « nombre », d'« infini », d'« existence », d'« Univers » et d'« interprétation ». Chacun d'eux constitue un terme courant et important. Dans cet intermède, nous portons notre regard sur ces notions et tentons d'apporter quelques définitions simples, mais suffisamment précises, en leur conservant, autant que possible, une connotation aguichante et divertissante. Par exemple, pouvez-vous expliquer à vos parents ce qu'est un concept ?

Défi 195 e

La raison pour laquelle nous devons étudier ces définitions est simple. Nous avons besoin d'éclaircissements pour parvenir au sommet de la Montagne Mouvement, c'est-à-dire, jusqu'à la description complète du mouvement. Par le passé, nombreux sont ceux qui se sont égarés par manque de concepts clairs. Afin d'esquiver ces problèmes, la physique possède un fil conducteur particulier. Toutes les sciences ont en commun un fait établi : chaque type de changement observé dans la nature représente une forme de mouvement. En ce sens, et *uniquement* en ce sens, la physique, qui se focalise sur l'étude du mouvement lui-même, constitue le fondement de toutes les autres sciences. Autrement dit, la recherche de la célèbre « théorie du Tout » est une expression arrogante qui désigne la recherche d'une *théorie du mouvement*. Bien que la connaissance du mouvement soit fondamentale, sa description précise n'implique pas forcément une description de « tout » : essayez simplement de résoudre un problème de mariage en utilisant l'équation de Schrödinger pour constater la différence.

Étant donné l'importance fondamentale du mouvement, il est nécessaire qu'en physique toutes les formulations sur les observations faites soient aussi précises que possible. Pour cette raison, un grand nombre de savants ont examiné les formulations physiques avec une attention toute particulière, en faisant appel à tous les critères imaginables. La

* « Tout ce que l'on peut penser peut être exprimé en termes clairs. » Cette citation ainsi que d'autres de Ludwig Wittgenstein sont tirées de l'ouvrage aussi court que célèbre *Tractatus logico-philosophicus*, écrit en 1918, édité pour la première fois en 1921. Il a été depuis traduit dans de nombreuses langues.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

FIGURE 83 Ludwig Wittgenstein.

physique est un babillage approfondi, tenu par des gens curieux à propos des choses qui bougent. Les critères pour la précision apparaissent une fois que nous nous demandons : quelles aptitudes ce discours requiert-il ? Vous pourriez vouloir en énumérer les réponses par vous-même.

Défi 196 e

Les aptitudes nécessaires pour discourir constituent encore un sujet de recherches aujourd'hui. Les biologistes de l'évolution étudient comment l'espèce humaine acquiert la capacité à discuter du mouvement. Les psychologues de l'enfance analysent la manière dont cette aptitude se développe chez un seul être humain. Les physiologistes, les neurologues et les informaticiens s'intéressent à la manière dont le cerveau et les facultés sensorielles rendent cela possible. Les linguistes se concentrent sur les propriétés du langage que nous utilisons, pendant que les logiciens, les mathématiciens et les philosophes des sciences étudient les propriétés générales des propositions sur la nature. Tous ces domaines d'étude examinent des outils qui sont essentiels pour le développement de la physique, la compréhension du mouvement et l'énumération des concepts non définis listés ci-dessus. Ces domaines organisent le présent chapitre.

L'ÉVOLUTION ET LE CERVEAU

> « Une poule est seulement la façon pour un œuf de faire un autre œuf. »
>
> Samuel Butler, *Life and Habit*.

L'évolution de l'espèce humaine est le fruit d'une longue histoire qui a déjà été contée dans de nombreux ouvrages excellents. Un tableau récapitulatif sur l'histoire de l'Univers est donné dans le chapitre sur la relativité générale. L'enchaînement presque invraisemblable des événements qui ont conduit à notre propre existence prend en compte la genèse des atomes, des galaxies, des étoiles, des planètes, de la Lune, de l'atmosphère, des premières cellules, des animaux marins, des animaux terrestres, des mammifères, des hominidés, des hommes, de nos ancêtres, de notre famille et finalement de nous-mêmes.

Réf. 140
Page 210
Réf. 141

La manière dont les particules qui nous constituent se sont déplacées au cours de ces événements, soufflées à travers l'espace, amassées sur la Terre, puis organisées pour façonner les êtres vivants, représente l'un des exemples les plus grandioses du mouvement. Le fait de s'imaginer et de méditer de temps à autre sur cette progression fantastique du mouvement peut constituer une expérience enrichissante.

Défi 197 e

En particulier, sans l'évolution biologique, nous ne pourrions pas discuter du mouvement, seuls les corps en mouvement peuvent étudier des corps en mouvement. Et si nous étions dépourvus de cerveau, nous ne serions capables ni de penser ni de parler. L'évolu-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tion fut également à l'origine de l'enfance et du désir de comprendre. Dans ce chapitre, nous découvrirons que chaque petit enfant appréhende déjà la majorité des concepts de la physique classique, au cours des expériences qu'il mène pendant sa croissance.

Les enfants, les lois et la physique

> « Les physiciens aussi ont une réalité partagée. En dehors de cela, il n'y a pas vraiment beaucoup de différence entre le fait d'être physicien et le fait d'être schizophrène. »
>
> Richard Bandler

Réf. 142

Réf. 143

Dans l'enfance, chacun est un physicien. Lorsque nous nous remémorons notre passé aussi loin que nous le pouvons, nous parvenons à un certain niveau, situé avant la naissance, qui forme le point de départ de l'expérience humaine. À cet instant magique, nous percevons d'une manière ou d'une autre que, à part nous-mêmes, il existe autre chose. La première observation que nous faisons concernant le monde qui nous entoure, durant la période prénatale, est donc la reconnaissance que nous pouvons distinguer deux parties : nous-même et le reste du monde. Cette distinction représente un exemple – peut-être le tout premier – d'un vaste nombre de « lois » de la nature qui constitueront des pierres d'achoppement tout au long de notre vie. En découvrant de plus en plus de différences, nous mettons de l'ordre dans le chaos de l'expérience. Nous découvrons rapidement que le monde est constitué de parties en relation, telles que maman, papa, le lait, la Terre, les jouets, etc.

Par la suite, lorsque nous apprenons à parler, nous nous amusons à employer des mots plus compliqués et nous désignons notre voisinage par *environnement*. En fonction du contexte, nous appelons l'ensemble formé par nous-même et l'environnement le *monde* (physique), l'*Univers* (physique), la *nature*, ou le *cosmos*. Ces concepts ne sont pas discernables l'un de l'autre dans cette promenade*, ils sont tous utilisés pour désigner la somme de toutes les parties et de leurs relations. Ils sont simplement considérés ici pour désigner le *tout*.

La découverte de la première distinction donne naissance à une avalanche de découvertes analogues. Nous extrayons les nombreuses distinctions qui sont possibles dans l'environnement, dans notre propre corps et dans les divers types d'interactions qui existent entre eux. L'aptitude à distinguer est la faculté primordiale qui nous permet de changer notre point de vue de celui du monde représenté par le *chaos*, c'est-à-dire comme un grand désordre, à celui du monde représenté par un *système*, c'est-à-dire un ensemble structuré, dans lequel les parties sont reliées selon des modalités spécifiques.

Défi 198 s

(Si vous aimez la précision, vous pouvez méditer sur le fait de savoir si les deux éventualités de « chaos » et de « système » sont les seules possibles. Nous reviendrons sur ce problème dans la dernière partie de notre ascension montagneuse.)

* Les différences dans l'usage peuvent être déduites à partir de leurs origines linguistiques. « Monde » est dérivé du latin *mundus* et l'équivalent anglais « world » est dérivé de l'ancien allemand « wer » – personne – et « ald » – vieux – et signifiait à l'origine « longévité ». « Univers » est tiré du latin, et désigne le tout – « unum » – que nous voyons tourner – « versus », et se réfère au ciel nocturne étoilé qui tourne autour de l'étoile Polaire. « Nature » provient également du latin, et signifie « ce qui est né ». « Cosmos » est issu du grec κόσμος et signifie à l'origine « ordre ».

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

En particulier, l'observation des différences qu'il y a entre soi-même et l'environnement va main dans la main avec l'acceptation que non seulement nous ne sommes pas indépendants de cet environnement, mais que nous y sommes fermement attachés de diverses façons inéluctables : nous pouvons tomber, nous faire mal, ressentir la chaleur, le froid, etc. De telles relations sont appelées *interactions*. Les interactions traduisent l'observation que, même si elles peuvent être distinguées, les parties de la nature ne peuvent pas être isolées. Autrement dit, les interactions décrivent la différence qui existe entre le tout et la somme de ses parties. Aucune partie ne peut être définie sans ses relations avec son environnement. (Êtes-vous d'accord ?)

Page 218

Défi 199 e

Les interactions ne sont pas arbitraires. Considérez par exemple simplement le toucher, l'odorat ou la vue : ils diffèrent par la portée, l'efficacité et les conséquences. Les aspects caractéristiques des interactions sont appelés *modèles de la nature*, *propriétés de la nature*, *règles de la nature* ou, de manière équivalente, avec leur désignation historique mais malencontreuse, « *lois* » *de la nature*. Le mot « loi » insiste sur leur validité générale ; malheureusement, il implique également préméditation, aspiration, astreinte et punition en cas de violation. Cependant, aucune préméditation, aspiration ou astreinte n'est sous-jacente dans les propriétés de la nature, pas plus qu'une violation n'est possible. L'expression ambiguë « loi de la nature », popularisée par René Descartes (1596–1650), a été adoptée de manière enthousiaste parce qu'elle donnait du poids aux lois des nations – lesquelles étaient loin d'être parfaites à cette époque – et à celles des autres organisations – qui étaient rares. Cette expression est un anthropomorphisme frappé du sceau du despotisme, qui laisse sous-entendre que la nature est « gouvernée ». Nous utiliserons par conséquent le moins souvent possible cette expression dans notre promenade, et elle sera, lorsque nous le ferons, toujours placée à l'intérieur de parenthèses « ironiques ». La nature ne peut pas être dirigée de quelque sorte que ce soit. Les « lois » de la nature ne sont pas des obligations pour celle-ci ou ses parties, elles ne sont des obligations que pour les physiciens et toutes les autres personnes : les modèles de la nature nous obligent à employer certaines descriptions et à en abandonner d'autres. À chaque fois que nous disons que « les lois gouvernent la nature » nous prononçons des absurdités, l'expression correcte est *les règles décrivent la nature*.

Au cours de notre enfance, nous apprenons à faire la distinction entre les interactions avec l'environnement (ou *perceptions*) : certaines sont partagées avec d'autres personnes et sont appelées *observations*, d'autres sont purement personnelles et sont appelées *sensations**. Un critère encore plus strict de « partageabilité » est employé pour diviser le monde entre « réalité » et « imagination » (ou « rêves »). Notre excursion montrera que cette dichotomie n'est pas essentielle, à condition que nous restions fidèles à notre quête d'une précision toujours plus grande : nous découvrirons que la description du mouvement que nous sommes en train de rechercher ne dépend pas du fait que le monde soit « réel » ou « imaginaire », « personnel » ou « général ».

Page ??

Les hommes jouissent de leur capacité à discerner les parties, qu'ils nomment également dans d'autres contextes des *détails*, des *aspects* ou des *entités*, et jouissent de leur aptitude à les associer ou à observer les *relations* qu'il y a entre elles. Les êtres humains

Réf. 145

* Un enfant qui est incapable de faire cette distinction parmi les perceptions – et qui est donc incapable de mentir – développe presque certainement un *autisme* ou en souffre déjà, comme des recherches psychologiques récentes l'ont montré.

Réf. 144

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

appellent cet exercice la *classification*. Les couleurs, les formes, les objets, une maman, les lieux, les gens et les idées sont des exemples d'entités que les hommes découvrent en premier.

Notre anatomie fournit un outil commode pour faire un usage efficace de ces découvertes : la *mémoire*. Elle emmagasine une grande quantité de données que nous appellerons *expérience* par la suite. La mémoire est un expédient employé par les enfants, de leur plus jeune âge jusqu'à leur maturité, pour organiser leur monde et pour parvenir à une certaine sérénité dans le chaos de la vie.

Les classifications mémorisées sont appelées des *concepts*. Jean Piaget fut le premier chercheur à décrire l'influence de l'environnement sur les concepts qu'un enfant se forge. Pas à pas, les enfants apprennent que les objets sont localisés dans l'espace, que celui-ci possède trois dimensions, que les objets chutent, que les collisions produisent du bruit, etc. En particulier, Piaget montra que l'espace et le temps ne sont pas *a priori* des concepts, mais la résultante des interactions que chaque enfant mène avec son environnement*.

Au cours de la période où un enfant va à l'école, celui-ci commence à comprendre l'idée de *constance des substances*, par exemple les liquides, et le concept de *contraire*. C'est uniquement à cette étape que son expérience subjective devient *objective*, grâce à
Réf. 147 la compréhension abstraite. Plus tard, la description du monde pour l'enfant cesse d'être animiste : avant ce stade, le Soleil, un ruisseau ou un nuage avaient *une âme*. En bref, ce

* Un tour d'horizon de l'origine de la psychologie évolutive est donné par J. H. FLAVELL, *The Developmental Psychology of Jean Piaget*, 1963. Ce travail synthétise les observations réalisées par le Suisse francophone Jean Piaget (1896–1980), la personnalité centrale dans ce domaine. Il fut un des premiers chercheurs à analyser le développement chez l'enfant de la même façon qu'un physicien analyse la nature : en observant attentivement, en prenant des notes, en réalisant des expériences, en en extorquant des hypothèses, en les testant, en y déduisant des théories. Ses publications incroyablement nombreuses, fondées sur ses amples observations, recouvrent presque toutes les phases du développement de l'enfant. Sa principale contribution concerne la description détaillée des phases du développement des aptitudes cognitives des êtres humains. Il montra que toutes les capacités mentales des enfants, la formation des concepts fondamentaux, leur manière de réfléchir, leur aptitude à parler, etc., résultent des interactions perpétuelles qui ont lieu entre l'enfant et l'environnement.

En particulier, Piaget décrivit la manière par laquelle les enfants apprennent pour la première fois qu'ils sont différents de l'environnement extérieur, et comment ils découvrent alors les propriétés physiques du monde. De ses nombreux livres qui traitent des concepts physiques, les deux qui ont particulièrement trait au sujet qui nous préoccupe sont J. PIAGET, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1972 et *Le développement de la notion de temps chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1981, ce dernier ouvrage étant né d'une suggestion due à Albert Einstein. Ces textes devraient faire partie de la culture littéraire de chaque physicien et philosophe des sciences intéressé par ces questions.

Piaget décrivit également comment chez les enfants l'intelligence mathématique et orale dérive de l'intelligence sensorimotrice, pratique, qui résulte elle-même d'habitudes et d'associations acquises pour construire de nouveaux concepts. L'intelligence pratique requiert la présence du système de réflexes apportés par la structure anatomique et morphologique de notre organisme. Ainsi son œuvre montre en détail que notre faculté à décrire mathématiquement le monde est fondée, quoique indirectement, sur l'interaction physique de notre organisme avec l'extérieur.

Certaines de ses opinions sur l'importance du langage dans le développement sont aujourd'hui en cours
Réf. 146 de révision, notamment à travers la redécouverte du travail de Lev Vigotsky, qui conjecture que toutes les aptitudes mentales supérieures, les émotions, la mémoire du passé, la pensée rationnelle, l'attention volontaire et la conscience de soi-même, ne sont pas innées, mais apprises. Cet apprentissage se produit à travers le langage et la culture, et en particulier à travers le processus de conversation avec soi-même.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

n'est qu'après la puberté qu'un homme est prêt pour la physique.

Bien que tout le monde ait été physicien dans son plus jeune âge, la plupart des gens restent des physiciens *classiques*. Nous progressons dans cette aventure, en tirant profit de toutes les possibilités offertes par un jouet dont nous a doté la nature : le cerveau.

> « L'expérience est le nom que chacun donne à ses erreurs. »
>
> Oscar Wilde, *Lady Windermere's Fan*.

Électronique des polymères

Le cerveau est électrique. Plus précisément, le cerveau est un dispositif électronique souple, composé de polymères, sans métaux, à durée de vie limitée, sensible et peu fiable. Par ailleurs, toutes ces propriétés sont partagées par l'électronique des polymères, qu'ils soient vivants ou non. C'est la raison pour laquelle l'électronique du commerce est généralement plutôt basée sur le silicium.

TABLEAU 16 Quelques aspects du cerveau humain.

Aspect	Détails	Équivalent informatique
Matériel		
Mémoire à ultra-court terme	5 à 9 concepts	mémoire cache
Hippocampe	détecteur de nouveauté, mémoire spatiale, apprentissage	mémoire vive et mémoire flash
Complexe amygdalien	émotions, apprentissage	ordonnanceur de priorité du système d'exploitation
Striatum ventral, fournisseur de dopamine et d'opioïde	système de récompense	ordonnanceur de priorité du système d'exploitation
Neurones dans le cortex	femmes env. $19{\cdot}10^9$, hommes env. $22{\cdot}10^9$	disque dur
Nombre de neurones perdus	femmes $e^{3{,}05-0{,}00145\cdot \text{âge}/a} \cdot 10^9$, hommes $e^{3{,}2-0{,}00145\cdot \text{âge}/a} \cdot 10^9$	disque dur
Impulsions échangées entre les deux moitiés du cerveau	$4 \cdot 10^9/s$	vitesse du bus interne
Nombre de synapses par neurone	10^4	
Total des connexions synaptiques	env. $2 \cdot 10^{14}$	cellules de mémoire
Voies des signaux d'entrée depuis l'œil	env. $2{\cdot}10^6$	câble d'appareil photo
Voies des signaux d'entrée depuis l'oreille	env. $2{\cdot}3000$	câble du micro

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Aspect	Détails	Équivalent informatique
Voies des signaux d'entrée depuis la peau, la bouche et le nez	env. $0,5 \cdot 10^6$	interfaces sensorielles
Capacité de signaux en entrée (total, 300 impulsions /s par voie)	env. 100 MB/s	bande passante entrante
Voies en sortie (muscles, organes)	env. $1,5 \cdot 10^6$	interfaces motrices
Capacité de signaux en sortie (total, 300 impulsions /s par voie)	env. 50 MB/s	bande passante sortante
Masse typique (cerveau d'Einstein)	1,230 kg	
Consommation (moyenne) d'énergie	1 600 à 2 200 kJ/j ou 18 à 25 W	
Durée de vie	130 ans	
Logiciel et traitement		
Apprentissage	modification de l'activité synaptique par la potentialisation à long terme	activer, classer, stocker
Sommeil profond	transferts structurés de l'hippocampe au cortex	sauvegarde vers le disque dur
Sommeil paradoxal (REM)	traitement différé	compression de données dans un traitement par lots

L'électronique des polymères qui façonne le cerveau est organisée comme un ordinateur. Certains détails sont indiqués dans le Tableau 16. Bien que les blocs fonctionnels d'un cerveau et d'un ordinateur soient similaires, les mécanismes spécifiques qu'ils utilisent sont d'ordinaire complètement distincts.

Réf. 148

Pourquoi un cerveau ?

> « Denken ist bereits Plastik*. »
>
> Joseph Beuys, sculpteur.

Réf. 149

Un grand nombre d'observations montrent que l'information sensorielle est traitée, c'est-à-dire classifiée, stockée et retrouvée dans le cerveau. Notamment, des lésions du cerveau peuvent conduire à la perte de tout ou partie de ces fonctions. Parmi les conséquences importantes de ces aptitudes fondamentales du cerveau, se trouvent la pensée et le langage. Toutes ces capacités émergent des rouages, de la « machinerie », du cerveau.

Réf. 150

Réf. 151

* « La pensée, c'est déjà de la sculpture. » Joseph Beuys (1920–1986).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Des systèmes ayant l'aptitude à déduire des classifications à partir des informations
Réf. 152 qu'ils reçoivent sont appelés des *classificateurs*, et on dit qu'ils sont capables d'*apprendre*. Notre cerveau partage cette propriété avec de nombreux systèmes complexes. Le cerveau d'un grand nombre d'animaux, mais également certains algorithmes informatiques, tels que ce que nous appelons des « réseaux de neurones », constituent des exemples de classificateurs. De tels systèmes sont étudiés dans plusieurs domaines, allant de la biologie
Réf. 154 à la neurologie, aux mathématiques et à l'informatique. Les classificateurs possèdent la double aptitude à dissocier et à associer, les deux étant essentielles pour la pensée.

Les machines classificatrices ont de nombreux points communs avec le cerveau. Par
Réf. 153 exemple, d'après une supposition récente importante en biologie de l'évolution, la nécessité de refroidir le cerveau d'une manière efficace est responsable de la marche verticale et bipède des êtres humains. Le cerveau a besoin d'un système de refroidissement puissant pour bien fonctionner. En cela, il ressemble aux ordinateurs modernes, qui possèdent en général des ventilateurs puissants ou même des systèmes de refroidissement liquides intégrés dans ceux-ci. Il apparaît que l'espèce humaine est dotée du système de refroidissement le plus performant de tous les mammifères. Une posture verticale permet à l'air de refroidir le corps de manière plus efficace dans les environnements tropicaux où les hommes ont évolué. Pour un meilleur refroidissement, les hommes sont également dépourvus de fourrure, excepté sur la tête où elle protège le cerveau du réchauffement direct dû au Soleil*.

Tous les classificateurs sont conçus à partir d'entités élémentaires de classification, qui sont parfois très nombreuses. En général, les unités élémentaires peuvent classer des informations dans seulement deux groupes distincts. Plus le nombre de ces entités, que nous appelons souvent « neurones » par analogie avec le cerveau, est grand, plus les classifications qui peuvent être produites par le classificateur sont sophistiquées**. Les classificateurs fonctionnent donc en appliquant des combinaisons plus ou moins sophistiquées des critères « identique » et « différent ». La distinction faite par un enfant entre des objets rouges et des objets bleus représente une telle classification. La distinction entre les groupes de symétrie de jauge compacts et non compacts en théorie quantique représente une classification plus élaborée, mais elle est fondamentalement reliée à la même aptitude.

Dans tous les classificateurs, les unités élémentaires de classification interagissent les unes avec les autres. Souvent ces interactions sont canalisées par des connexions, et l'ensemble est alors appelé un *réseau*. Dans ces jonctions, des signaux sont échangés, via des objets mobiles tels que des électrons ou des photons. Nous parvenons donc à la conclusion que la capacité du cerveau à classer le monde physique, pour distinguer des objets en mouvement qui interagissent les uns avec les autres par exemple, constitue une conséquence du fait qu'il est lui-même constitué d'objets en mouvement qui interagissent les uns avec les autres. Sans un classificateur performant, les hommes ne seraient pas devenus une espèce animale si prospère. Et seul le mouvement produit dans notre cerveau nous permet de parler du mouvement en général.

* La posture verticale permit par la suite aux hommes de prendre leur respiration indépendamment de leur marche, une prouesse que de nombreux animaux ne peuvent réaliser. Cela permit ensuite aux hommes de développer la parole. Et celle-ci permit enfin le développement du cerveau.

** Une bonne introduction aux réseaux de neurones est donnée dans J. HERTZ, A. KROGH & R. PALMER, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison Wesley, 1991.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

De nombreux chercheurs ont identifié les zones du cerveau utilisées lorsque des tâches intellectuelles différentes sont réalisées. Ces expériences sont devenues possibles en utilisant l'imagerie par résonance magnétique et d'autres méthodes. D'autres chercheurs ont étudié comment le processus de pensée peut être façonné à partir de la structure du cerveau. La neurologie fait des progrès constants. En particulier, elle a fermement anéanti la croyance que la pensée est *plus* qu'un processus physique. Cette croyance est issue de craintes personnelles, comme vous pourriez le vérifier par introspection. Elle disparaîtra avec le temps. Comment démontreriez-vous que la pensée est uniquement un processus physique ?

Page ??
Défi 200 s

Qu'est-ce que l'information ?

> « Ces pensées ne me viennent pas sous leur forme verbale. Je pense rarement en mots. Une pensée vient et ensuite j'essaye de l'exprimer avec des mots. »
>
> Albert Einstein

Nous avons commencé en stipulant que l'étude de la physique signifie que nous devons discuter du mouvement. Les paroles sont une transmission d'informations. L'information peut-elle être mesurée ? Pouvons-nous quantifier l'avancée de la physique de cette manière ? L'Univers est-il constitué d'informations ?

L'information est la résultante de la classification. Une classification représente la réponse à une ou à plusieurs questions de type oui–non. Ces questions sont les classifications les plus simples possibles, elles fournissent les *unités* élémentaires de classification, à partir desquelles toutes les autres peuvent être bâties. La façon la plus simple pour mesurer l'information consiste, par conséquent, à comptabiliser le nombre de questions de type oui–non concernées, les *bits*, qui conduisent à celle-ci. Êtes-vous capable de dire combien de bits sont nécessaires pour définir le lieu où vous vivez ? Manifestement, ce nombre de bits dépend de l'ensemble des questions considérées. Cela pourrait être les noms de toutes les rues d'une ville, l'ensemble de toutes les coordonnées de la surface de la Terre, le nom de toutes les galaxies présentes dans l'Univers, l'ensemble de toutes les combinaisons de lettres de l'adresse. Quelle est la méthode la plus efficace que vous puissiez imaginer ? Une variante de cette méthode combinatoire est employée dans les ordinateurs. Par exemple, le récit de cette promenade nécessite à peu près mille millions de bits. Mais puisque la quantité d'information présente dans une lettre ordinaire dépend de l'ensemble des questions que nous avons choisi, il est impossible de définir une mesure précise pour l'information de cette manière.

Défi 201 s

La seule façon de mesurer précisément l'information consiste à prendre l'ensemble le plus vaste possible des questions qui peuvent être posées concernant un système, et de le comparer avec ce que nous savons de ce système. Dans cette situation, la quantité d'information inconnue est appelée entropie, un concept que nous avons déjà rencontré. Avec cette approche, vous devriez être capable de déduire s'il est réellement possible de mesurer l'avancée de la physique.

Page 254
Défi 202 s

Puisque la catégorisation représente une activité du cerveau et des autres classificateurs analogues, l'information telle qu'elle est définie ici est un concept qui s'applique au résultat des activités menées par les individus et par les autres classificateurs. En bref, l'in-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

formation est produite lorsque nous parlons de l'Univers – l'Univers lui-même n'est *pas la même chose* que l'information. Il y a un nombre croissant de publications fondées sur le point de vue opposé, cependant c'est un court-circuit conceptuel. N'importe quelle transmission d'information implique l'existence d'une interaction ; physiquement parlant, cela signifie que n'importe quelle information a besoin d'*énergie* pour la transmission et de *matière* pour le stockage. Sans celles-ci, il n'y a pas d'information. En d'autres termes, l'Univers, avec sa matière et son énergie, doit avoir existé *avant* que la transmission d'information fût possible. Dire que l'Univers est constitué d'informations est un pléonasme et n'a pas plus de sens que d'affirmer qu'il est constitué de dentifrice.

Le but de la physique est de fournir une classification *exhaustive* de tous les types et exemples de mouvement, autrement dit de tout connaître sur le mouvement. Est-ce possible ? Ou êtes-vous capable de trouver un argument qui va à l'encontre de cette démarche ?

Défi 203 s

QU'EST-CE QUE LA MÉMOIRE ?

> « Le cerveau est mon deuxième organe préféré. »
> Woody Allen

La mémoire est la collection des enregistrements des perceptions. La production de ces enregistrements constitue l'aspect primordial de l'observation. Les relevés peuvent être emmagasinés dans la mémoire humaine, c'est-à-dire dans le cerveau, dans la mémoire d'une machine, comme dans les ordinateurs, ou dans la mémoire d'un objet, tel que des notes sur une feuille de papier. Sans mémoire, il n'y a pas de science, de vie – car la vie est basée sur des enregistrements situés à l'intérieur de l'ADN – et plus particulièrement aucun plaisir, comme le démontre la vie morose de ceux qui ont perdu la mémoire.

Réf. 150

Évidemment, chaque enregistrement est un objet. Mais sous quelles conditions un objet est-il qualifié d'enregistrement ? Une signature peut représenter l'enregistrement d'un accord sur une transaction commerciale. Un unique point minuscule d'encre n'est pas un enregistrement, parce qu'il pourrait apparaître par erreur, par exemple par une tache accidentelle. Au contraire, il est improbable que l'encre puisse tomber sur une feuille exactement sous la forme d'une signature. (Les signatures simples des médecins sont évidemment des exceptions.) Pour le dire simplement, un *enregistrement* est tout objet, qui, pour être copié, doit être fabriqué. Plus précisément, un enregistrement est un objet ou une situation qui ne peut pas être produit ni disparaître par erreur ou par chance. Nos souvenirs personnels, qu'ils soient des images ou des voix, possèdent la même propriété. Nous pouvons généralement les croire, parce qu'ils sont si précis qu'ils ne peuvent pas être arrivés là par hasard ou par un processus non contrôlé qui aurait eu lieu dans notre cerveau.

Pouvons-nous faire une estimation de la probabilité qu'un enregistrement surgisse ou disparaisse par hasard ? Oui, nous le pouvons. Chaque enregistrement est constitué d'un nombre caractéristique N de petites entités, par exemple le nombre de points d'encre possibles sur une feuille, le nombre de cristaux de fer sur une bande magnétique, des électrons dans un bit d'une mémoire d'ordinateur, des grains d'iodure d'argent dans un négatif photographique, etc. Les perturbations aléatoires qui ont lieu dans chaque

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

mémoire sont dues aux fluctuations internes, également appelées *bruit*. Le bruit fait que l'enregistrement n'est plus lisible : cela peut être de la saleté sur une signature, une variation thermique de l'aimantation dans les cristaux de fer, du bruit électromagnétique à l'intérieur d'une mémoire à l'état solide, etc. On rencontre le bruit dans tous les classificateurs, puisqu'il est inhérent à toutes les interactions et donc à tout traitement de l'information.

Une propriété générale concerne le fait que les fluctuations internes engendrées par le bruit diminuent lorsque la taille, c'est-à-dire le nombre de constituants de l'enregistrement, s'accroît. En réalité, la probabilité p_{err} pour qu'il y ait une erreur de lecture ou
Défi 204 pe d'écriture sur un enregistrement varie selon

$$p_{\text{err}} \sim 1/N \,, \tag{73}$$

où N représente le nombre de particules ou de sous-systèmes utilisés pour le stocker. Cette relation se tient parce que, pour des nombres très grands, ce que nous appelons la *loi normale* constitue une excellente approximation de pratiquement tous les processus. La largeur de la courbe en forme de cloche de la loi normale, qui détermine la probabilité d'avoir des erreurs d'enregistrement, croît moins rapidement que son intégrale lorsque
Défi 205 pe l'on augmente le nombre d'entités. (Pouvez-vous confirmer ce point ?)

Nous concluons que tout enregistrement de bonne qualité doit être constitué d'un *très grand* nombre d'entités. Plus ce nombre est grand, moins la mémoire est sensible aux fluctuations. Maintenant, un système de très grande taille ayant des fluctuations négligeables est appelé un *bain (physique)*. Seuls les bains rendent les mémoires possibles. Autrement dit, chaque enregistrement contient un bain. Nous concluons que toute *observation* d'un système représente l'interaction de ce système avec un bain. Cette correspondance sera utilisée à plusieurs reprises par la suite, en particulier dans la théorie quantique. Quand un enregistrement est produit par une machine, l'« observation » est ordinairement appelée une *mesure (généralisée)*. Êtes-vous capable de spécifier quel est ce bain dans le cas
Défi 206 s d'une personne admirant un paysage ?

À partir de la discussion précédente, nous pouvons déduire une conclusion de première importance : puisque nous avons une excellente mémoire à notre disposition, nous pouvons inférer que nous sommes faits de nombreuses petites parties. Et puisque les enregistrements existent, le monde doit également être fait d'un vaste nombre de petites parties. Aucun microscope, quel que soit son type, n'est nécessaire pour confirmer l'existence des molécules ou des petites entités analogues, un tel instrument n'est nécessaire que pour déterminer les *tailles* de ces particules. Leur existence peut être déduite simplement à partir de l'observation que nous possédons une mémoire. (Bien évidemment, le don d'ubiquité du bruit est un autre argument qui démontre que la matière est composée
Page 231 de minuscules parties.)

Une deuxième conclusion fut popularisée vers la fin des années 1920 par Léo Szilard. Le fait d'écrire dans une mémoire ne produit pas d'entropie ; il est possible de stocker de l'information dans une mémoire sans augmenter l'entropie. Toutefois, celle-ci est produite à chaque fois que la mémoire est *effacée*. Il apparaît que l'entropie (minimale) créée
Défi 207 pe en effaçant un bit est donnée par

$$S_{\text{par bit effacé}} = k \ln 2 \,, \tag{74}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

et le nombre $\ln 2 \approx 0,69$ représente le logarithme népérien de 2. D'un côté le fait de détruire réduit le désordre des données – l'entropie locale –, mais d'un autre côté cela augmente l'entropie totale. Comme nous le savons bien, de l'énergie est nécessaire pour réduire l'entropie d'un système local. En bref, tout système qui efface sa mémoire requiert de l'énergie. Par exemple, une porte logique ET efface effectivement un bit par opération. La pensée logique demande donc de l'énergie. Nous savons également que le fait de *rêver* est associé à une perte et une réorganisation de l'information. Serait-ce pour cette raison que, lorsque nous sommes très épuisés, dépourvus d'énergie résiduelle, nous ne rêvons pas autant que d'habitude ?

Défi 208 s

L'entropie est donc nécessairement créée lorsque nous oublions. Cela devient flagrant quand nous nous rappelons que l'oubli est similaire à la détérioration d'un manuscrit ancien. L'entropie augmente quand le manuscrit n'est plus lisible, puisque ce processus est irréversible et dissipatif*. Une autre manière de s'en rendre compte consiste à reconnaître que, pour remettre à zéro une mémoire, par exemple une bande magnétique, nous devons lui fournir de l'énergie, et donc accroître son entropie. Inversement, le fait d'*écrire* dans une mémoire peut souvent *réduire* l'entropie ; nous nous souvenons que les signaux, les entités qu'écrivent les mémoires, transportent une entropie négative. Par exemple, l'écriture sur des bandes magnétiques réduit généralement leur entropie.

Réf. 155

La puissance du cerveau

> « Les ordinateurs sont harassants. Ils ne peuvent donner que des réponses. »
> (Faussement) attribué à Pablo Picasso

Le cerveau humain est conçu de telle manière que ses fluctuations ne peuvent détruire son contenu. Le cerveau est bien protégé par le crâne précisément pour cette raison. De surcroît, il cultive littéralement des connexions, appelées *synapses*, entre ses divers *neurones*, qui sont les cellules qui effectuent le traitement du signal. Le neurone est l'élément fondamental de traitement du cerveau, il exécute la classification de base. Il ne peut effectuer que deux choses : s'activer ou non. (Il est possible que le temps pendant lequel un neurone s'active transporte aussi de l'information, cette question n'est pas définitivement tranchée.) Le neurone délivre un signal en fonction des informations qu'il reçoit, lesquelles arrivent par les synapses depuis des centaines d'autres neurones. Un neurone constitue donc un élément qui peut distinguer les données qu'il reçoit en deux catégories : celles qui conduisent à une activation et celles qui ne le font pas. Les neurones sont donc des classificateurs du type le plus simple, uniquement capables de faire la distinction entre deux situations.

Réf. 158, Réf. 159

---

* Comme Wojciech Zurek l'explique de façon claire, l'entropie créée à l'intérieur de la mémoire constitue la principale raison pour laquelle même un démon de Maxwell ne peut pas réduire l'entropie de deux volumes de gaz en ouvrant une porte située entre eux, de telle manière que les molécules rapides s'accumulent d'un côté et les molécules lentes s'accumulent de l'autre côté. (Maxwell avait introduit ce « démon » en 1871, pour éclaircir les limites imposées par la nature aux divinités.) C'est seulement une autre manière de reformuler le résultat ancien de Léo Szilard, qui avait montré que les mesures effectuées par le démon créent plus d'entropie qu'elles ne peuvent en économiser. Et chaque appareil de mesure contient intrinsèquement une mémoire.

Réf. 156

Réf. 157

Pour s'amuser avec le démon de Maxwell, visitez le site www.wolfenet.com/~zeppelin/maxwell.htm.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Chaque fois que nous stockons quelque chose dans notre mémoire à long terme, comme un numéro de téléphone, de nouvelles synapses se développent, ou la connexion de synapses préexistantes est renforcée. Ces connexions entre les neurones sont beaucoup plus fortes que les fluctuations qui surgissent dans le cerveau. Seules les fortes perturbations, comme un vaisseau sanguin obstrué ou une lésion cérébrale, peuvent détruire des neurones et aboutir à la perte de mémoire.

Dans son ensemble, le cerveau fournit une mémoire extrêmement efficace. En dépit d'efforts insurmontables, les ingénieurs n'ont pas encore été capables de concevoir une mémoire ayant la puissance du cerveau dans le même volume. Estimons la capacité de cette mémoire. En multipliant le nombre de neurones, environ 10^{11}*, par le nombre moyen de synapses par neurone, environ 100, et par le nombre estimé de bits stockés dans chaque synapse, environ 10, nous parvenons à une capacité de stockage pour le cerveau d'environ

$$M_{\text{réinscriptible}} \approx 10^{14}\,\text{bits} \approx 10^{4}\,\text{Go}\,. \tag{75}$$

(Un *octet*, noté o, est le nom courant qui désigne huit bits d'information.) Remarquez que l'évolution est parvenue à placer autant de neurones dans le cerveau qu'il y a d'étoiles dans la Galaxie, et que si nous mettons bout à bout toutes les synapses, nous obtenons une longueur totale d'environ 10^{11} m, ce qui correspond à la distance qui sépare la Terre du Soleil. Notre cerveau est vraiment *astronomiquement* complexe.

En pratique, la capacité du cerveau semble quasiment sans limites, puisqu'il libère de la mémoire à chaque fois qu'il a besoin d'un certain espace nouveau, en *effaçant* des données anciennes, par exemple au cours du sommeil. Remarquez que cette estimation standard de 10^{14} bits n'est pas réellement exacte ! Elle présuppose que l'unique composante de stockage de l'information dans le cerveau est l'effectif synaptique. Par conséquent elle ne mesure que la capacité de stockage *effaçable* du cerveau. En fait, l'information est également emmagasinée dans la structure cérébrale, c'est-à-dire dans la configuration exacte selon laquelle chaque cellule est reliée aux autres cellules. La majeure partie de cette structure est figée vers l'âge de deux ans, mais elle continue à se développer à un niveau plus faible durant le reste de la vie humaine. En supposant que pour chacune des N cellules ayant n connexions il y a $f\,n$ possibilités de connexions, cette capacité d'écriture *non réinscriptible* du cerveau peut être estimée à approximativement $N\sqrt{f\,n}\,f\,n \log f\,n$ bits. Pour $N = 10^{11}$, $n = 10^{2}$, $f = 6$, cela donne

Défi 209 pe

$$M_{\text{non réinscriptible}} \approx 10^{16}\,\text{bits} \approx 10^{6}\,\text{Go}\,. \tag{76}$$

Réf. 160 Des mesures récentes ont confirmé que les individus bilingues, particulièrement les bilingues précoces, possèdent une densité supérieure de matière grise dans le petit cortex pariétal de l'hémisphère gauche du cerveau. C'est une zone principalement impliquée dans le traitement du langage. Le cerveau tire donc également profit des variations structurelles pour optimiser le stockage et le traitement.

À ce propos, bien que le cerveau des cachalots et des éléphants puisse être cinq à six

* Le nombre de neurones semble être constant et fixé dès la naissance. La croissance la plus élevée des interconnexions se situe entre un an et trois ans ; on affirme qu'elle atteint alors jusqu'à 10^{7} nouvelles connexions par seconde.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

fois plus lourd que celui des hommes, le nombre de neurones et de connexions, et ainsi la capacité sont inférieurs à ceux des humains.

Parfois on entend proclamer que les gens utilisent entre 5 % et 10 % seulement de leurs capacités cérébrales. Cette croyance, qui nous fait revenir au dix-neuvième siècle, impliquerait qu'il est possible de mesurer les véritables données stockées dans le cerveau et de les comparer avec sa capacité, ce qui est d'une fiabilité impossible. D'autre part, ce mythe signifie que la capacité de traitement peut être mesurée. Il entraîne aussi que la nature aurait développé et maintenu un organe ayant 90 % de surcapacité, gaspillant toute l'énergie et la matière nécessaires pour le construire, le réparer et le préserver. Cette croyance est erronée.

La vaste capacité de stockage du cerveau montre également que la mémoire humaine est alimentée par l'environnement et n'est pas innée : un ovule humain et un spermatozoïde possèdent à eux deux une masse d'à peu près 1 mg, ce qui correspond à environ $3 \cdot 10^{16}$ atomes. Manifestement, les fluctuations font qu'il est impossible d'y stocker 10^{16} bits. En réalité, la nature n'emmagasine que $3 \cdot 10^9$ bits environ dans les gènes d'un ovule, en utilisant 10^7 atomes par bit. Par opposition, un cerveau typique possède une masse de 1,5 à 2 kg, et contient environ 5 à $7 \cdot 10^{25}$ atomes, ce qui le rend aussi efficace qu'un ovule. La différence entre le nombre de bits dans l'ADN humain et dans le cerveau montre de manière élégante que presque toute l'information stockée dans le cerveau est extraite de l'environnement. Elle ne peut pas être d'origine génétique, même en imaginant l'existence d'une décompression astucieuse de l'information stockée.

Au final, toutes ces astuces utilisées par la nature accouchent du plus puissant classificateur connu jusqu'à présent*. Existe-t-il des limites à la capacité du cerveau pour mémoriser et pour classifier ? Avec les outils que les hommes ont développés pour étendre les possibilités du cerveau, tels que le papier, l'écriture et l'impression pour venir en aide à la mémoire, et les très nombreux outils disponibles pour simplifier et pour abréger les classifications explorées par les mathématiciens, la classification cérébrale est limitée uniRéf. 161 quement par le temps passé à l'exercer. Sans outils, il existe des limites contraignantes, bien sûr. Le cortex cérébral de deux millimètres d'épaisseur des êtres humains possède une surface équivalente à environ quatre feuilles de papier A4, celui du chimpanzé est d'une feuille et celui d'un singe de la taille d'une carte postale. Nous estimons que la mémoire totale intellectuellement accessible est de l'ordre de

$$M_{\text{intellectuelle}} \approx 1\,\text{Go}\,, \tag{77}$$

avec cependant une grande marge d'erreur expérimentale.

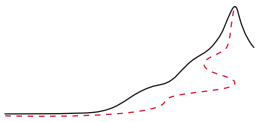
Le cerveau possède également une capacité de traitement non parallèle. On démontre cela de la manière la plus éclatante par la conséquence la plus importante qui dérive de la mémoire et de la classification : la pensée et le langage. En réalité, les nombreux types de pensée ou de langage que nous employons, tels que la comparaison, la distinction, le souvenir, la reconnaissance, l'association, la description, la déduction, l'explication, l'imagination, etc., décrivent tous différentes manières de classifier les mémoires ou les perceptions. Au final, chaque type de pensée ou d'élocution classifie directement

* La puissance consommée du cerveau est également importante : bien qu'il ne représente que 2 % environ de la masse corporelle, il utilise 25 % de l'énergie issue de l'alimentation.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ou indirectement les observations. Ô combien les ordinateurs sont-ils loin d'accomplir cela ! La première tentative, en 1966, fut une plaisanterie de programmeur due à Joseph Weizenbaum : le célèbre programme de dialogue homme–machine Eliza (essayez-le sur www.manifestation.com/neurotoys/eliza.php3) est une parodie du jeu du psychanalyste. Même aujourd'hui, plus de 40 ans après, la conversation avec un programme informatique comme Friendbot (trouvez-le sur www.friendbot.co.uk) constitue toujours une expérience décevante. Pour appréhender les raisons pour lesquelles ce développement reste laborieux, nous nous demandons :

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 9

LA PENSÉE ET LE LANGAGE

Qu'est-ce que le langage ?

> « Gardez-vous le droit de penser, car penser faussement est mieux que de ne pas penser du tout. »
>
> Hypatie d'Alexandrie

> « Ein Satz kann nur sagen, *wie* ein Ding ist, nicht *was* es ist*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.221

Le langage est probablement le don le plus précieux de la nature humaine. En exploitant la capacité à produire des sons et à coucher de l'encre sur une feuille, les individus attribuent certains *symboles***, également dénommés *mots* ou *termes* dans ce contexte, aux nombreuses entités abstraites qu'ils produisent à l'aide de leur pensée. On dit alors qu'une telle catégorisation est utilisée pour définir un *concept* ou une *notion* ; elle est mise en *italique* dans ce texte. Un ensemble élémentaire de concepts forme un langage***. En d'autres termes, un *langage (humain)* représente un procédé typique par lequel les gens interagissent symboliquement entre eux****. Il existe des langages humains fondés sur des expressions du visage, sur des gestes, sur des mots prononcés, sur des sifflements, sur des mots écrits, et d'autres. L'emploi du langage *parlé* est considérablement plus jeune que l'espèce humaine, il semble qu'il soit apparu il y a deux cent mille ans environ seulement. Le langage écrit est encore plus récent, c'est-à-dire vieux de seulement six mille ans environ. Mais l'ensemble des concepts utilisés, le *vocabulaire*, est toujours en expansion.

---

* Les propositions peuvent uniquement dire *comment* sont les choses, et non pas *ce qu'elles* sont.

** Un symbole est une catégorie de *signe*, c'est-à-dire une entité associée par une certaine convention à l'objet auquel il se réfère. D'après Charles Peirce (1839–1914) – lisez www.peirce.org – le philosophe le plus original qui soit né aux États-Unis, un symbole diffère d'une *icône* (ou *image*) et d'un *indicateur*, qui sont également attachés à des objets par convention, en ceci qu'il ne ressemble pas à l'objet, à la différence de l'icône, et en ceci qu'il ne possède aucun contact avec l'objet, à la différence d'un indicateur.

*** La reconnaissance que le langage est fondé sur une division des idées, en utilisant les diverses différences qui existent entre elles pour les distinguer, émergea avec le penseur suisse Ferdinand de Saussure (1857–1913), qui est considéré comme le fondateur de la linguistique. Son manuel *Cours de linguistique générale*, Éditions Payot, 1985, est resté le cadre de référence de ce domaine durant plus d'un demi-siècle. Remarquez que Saussure, contrairement à Peirce, préfère utiliser le mot « signe » à celui de « symbole », et que sa définition du mot « signe » inclut également l'objet auquel il se réfère.

**** Pour des définitions légèrement différentes et une profusion d'informations complémentaires intéressantes concernant le langage, lisez l'ouvrage magnifique de David Crystal, *The Cambridge Encyclopedia of Language*, Cambridge University Press, 1987.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 17 Fondamentaux du langage.

Aspect	Valeur
Phonèmes humains	env. 70
Phonèmes anglais	44
Phonèmes allemands	40
Phonèmes français	37
Phonèmes italiens	30
Mots de la langue anglaise (plus nombreux que la plupart des langues, avec une exception possible pour l'allemand)	env. 350 000
Nombre de langues sur Terre en l'an 2000	env. 8 000

Pour les êtres humains, la compréhension du langage commence peu de temps après la naissance (peut-être même avant), son utilisation active débute à l'âge d'un an environ, la faculté de lire peut commencer dès l'âge de deux ans, et le vocabulaire personnel continue de s'enrichir tant que l'intérêt demeure vivant.

La physique étant une manière oisive de discuter du mouvement, elle fait usage du langage comme d'un outil essentiel. Des nombreux aspects du langage, de la littérature à la poésie, des blagues aux ordres militaires, de toutes les expressions d'encouragement, de rêves, d'amour et d'émotion, la physique n'utilise qu'une petite portion plutôt particulière. Cette tranche est définie par la restriction inhérente à la discussion sur le mouvement. Puisque le mouvement est une observation, c'est-à-dire une interaction avec l'environnement, que plusieurs personnes éprouvent de la même façon, ce choix pose un grand nombre de restrictions sur le contenu – le vocabulaire – et sur la forme – la grammaire – de ces discussions.

Par exemple, à partir de la définition que les observations sont partagées par d'autres, nous obtenons la nécessité que les formulations qui les décrivent soient traduisibles dans toutes les langues. Mais à partir de quand une formulation peut-elle être traduite ? Deux points de vue radicalement opposés sont possibles sur cette question : le premier soutient que *toutes* les propositions peuvent être traduites, puisqu'il découle des propriétés du langage humain que chacun d'eux peut exprimer toutes les formulations possibles. Selon cette idée, seuls les systèmes de signes qui nous permettent d'exprimer le spectre complet des messages humains forment un *langage humain*. Cette propriété distingue le langage des signes et la parole des langages des animaux, tels que les signes utilisés par les singes, les oiseaux ou les abeilles, mais également des langages informatiques, tels que le Pascal ou le langage C. Avec cette signification du langage, toutes les déclarations peuvent être traduites, par définition.

Il est encore plus stimulant de suivre le point de vue opposé dans une discussion, à savoir que la traduction précise n'est possible que pour les déclarations qui utilisent des termes, des types de mots et des structures grammaticales que nous rencontrons dans *toutes* les langues. La recherche linguistique a consacré des efforts considérables dans le dépouillement des *universaux* phonologiques, grammaticaux et sémantiques, comme nous les appelons, à partir des quelque 7 000 langues que nous pensons qu'il existe au-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

jourd'hui*.

L'analyse de l'aspect *phonologique*, qui a montré par exemple que chaque langue possède au minimum deux consonnes et deux voyelles, ne fournit aucun support pour cette discussion concernant la traduction**. En étudiant l'aspect *grammatical* (ou *syntaxique*), nous découvrons que toutes les langues utilisent des éléments de base, appelés « mots », qu'elles regroupent en phrases. Elles ont toutes des pronoms pour la première et la deuxième personne, « je » et « tu », et contiennent toujours des noms et des verbes. Toutes les langues utilisent des *sujets* et des *attributs* ou, comme nous le disons généralement, les trois entités *sujet*, *verbe* et *complément d'objet*, bien que ce ne soit pas toujours
Défi 210 e dans cet ordre. Vérifiez-le avec les langues que vous connaissez.

Sur l'aspect *sémantique*, la longue liste des universaux lexicaux, c'est-à-dire des mots qui apparaissent dans toutes les langues, tels que « mère » ou « Soleil », s'est récemment vu attribuer une structure. La linguiste Anna Wierzbicka a réalisé une recherche des briques de base à partir desquelles tous les concepts peuvent être définis. Elle a recherché la définition de chaque concept à l'aide de ceux qui sont les plus simples, et a persévéré ainsi jusqu'à ce qu'un niveau fondamental soit atteint, qui ne puisse pas être davantage décomposé. L'ensemble des concepts qui restent alors est représenté par les primitives. En réitérant cet exercice pour de nombreuses langues, Wierzbicka s'aperçut que cette liste est la même dans tous les cas. Elle avait ainsi découvert les *primitives sémantiques universelles*. En novembre 1992, cette liste contenait les mots donnés dans le Tableau 18.

D'après les longues études d'Anna Wierzbicka et de son école de recherche, tous ces concepts existent dans toutes les langues du monde étudiées jusqu'à présent***. Ils ont établi la signification de chaque primitive en détail, réalisé des vérifications cohérentes et évincé les approches alternatives. Ils ont vérifié cette liste dans des langues issues de tous les groupes de langues, dans les langues de tous les continents, montrant ainsi que ce résultat est valable partout. Dans chaque langue, tous les autres concepts peuvent être
Réf. 163 définis à l'aide des primitives sémantiques.

Pour le formuler simplement, l'apprentissage de la parole implique l'acquisition de ces termes fondamentaux, l'apprentissage de la manière de les combiner et l'assimilation des désignations de ces composés. La définition du langage donnée ci-dessus, à savoir celle d'un moyen de communication qui nous permet d'exprimer toutes les choses que

* Une liste étendue avec 6 800 langues (et avec 41 000 noms d'idiomes et de dialectes) peut être consultée sur le site Web de Barbara Grimes, *Ethnologue – Languages of the World*, que vous pouvez trouver à l'adresse www.ethnologue.com ou dans un livre qui porte le même titre.

On estime que 15 000 ± 5 000 langues ont existé dans le passé.

Néanmoins, dans le monde d'aujourd'hui, et de manière certaine dans les sciences, il est souvent suffisant de connaître sa propre langue maternelle et l'anglais. Puisque l'anglais est la langue ayant le plus grand nombre de mots, bien l'apprendre représente un défi plus important que l'apprentissage de la plupart des
Réf. 162 autres langues.

** Les études explorent des thèmes tels que l'observation que dans un grand nombre de langues le mot désignant « petit » contient un « i » sonore (ou un « e » aigu) : little, piccolo, klein, tiny, pequeño, chiisai, les exceptions étant : small, parvus.

*** Il est facile d'imaginer que ces recherches marchent sur les pieds de nombreuses personnes. Une liste qui soutient que « vrai », « bien », « création », « vie », « mère » ou « dieu » sont composés provoquera des réactions violentes, malgré la justesse de ces affirmations. En réalité, certains de ces termes furent ajoutés dans la liste de 1996, qui est un tant soit peu plus longue. De surcroît, une liste qui soutient que nous n'avons qu'à peu près trente concepts fondamentaux dans nos esprits est considérée par beaucoup comme affligeante.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 18 Les primitives sémantiques, d'après Anna Wierzbicka.

I, you, someone, something, people	[substantifs]
this, the same, one, two, all, much/many	[déterminatifs et quantificateurs]
know, want, think, feel, say	[prédicats mentaux]
do, happen	[action, événement et mouvement]
good, bad	[évaluateurs]
big, small	[descripteurs]
very	[intensificateur]
can, if (would)	[modalité irréelle]
because	[causalité]
no (not)	[négation]
when, where, after (before), under (above)	[temps et lieu]
kind of, part of	[taxonomie, partonomie]
like	[limite/similarité]

nous souhaitons dire, peut ainsi être raffinée : un *langage humain* représente n'importe quel ensemble de concepts qui intègre les primitives sémantiques universelles.

Pour les physiciens – qui ont pour objectif de discuter avec le nombre de mots le plus petit possible –, la liste des primitives sémantiques possède trois facettes. Premièrement, cette approche est attrayante, car elle est similaire à l'idéal même de la physique : l'idée de primitive attribue une structure rudimentaire à toutes les choses qui peuvent être dites, de même que les éléments atomiques structurent tous les objets qui peuvent être observés. Deuxièmement, la liste des primitives peut être organisée. En réalité, celle-ci peut être divisée en deux groupes : un groupe qui contient tous les termes décrivant le mouvement (faire, se produire, quand, où, ressentir, petit, etc. – peut-être un terme pour le champ sémantique relatif à la lumière ou à la couleur devrait-il être ajouté) et l'autre groupe qui contient tous les termes nécessaires pour parler des ensembles abstraits et des relations (ceci, tout, comme ça, non, si, etc.). Même pour les linguistes, les aspects du mouvement et les concepts logiques sont les entités fondamentales de l'expérience et de la pensée humaines. Pour exprimer ce sujet en termes plus concrets, les primitives sémantiques contiennent les éléments de base de la physique et les éléments de base des mathématiques. Tous les êtres humains sont donc à la fois des physiciens et des mathématiciens. Le troisième point est que la liste des primitives est trop longue. La division de cette liste en deux catégories suggère directement l'existence de listes plus courtes, nous devons juste demander aux physiciens et aux mathématiciens des résumés concis de leurs domaines respectifs. Pour apprécier cet objectif, essayez de définir ce que « si » signifie ou ce qu'un « opposé » est –, et explorez vos propres manières de réduire cette liste.

Défi 211 d

La réduction de la liste des primitives représente également un de nos buts dans cette aventure. Nous explorerons le groupe mathématique des primitives dans ce chapitre, le groupe physique nous occupera durant le reste de notre aventure. Cependant, une liste plus succincte de primitives n'est pas suffisante. Notre objectif est de parvenir à une liste constituée d'*un seul* concept élémentaire. Toutefois, atteindre ce but n'est pas aisé.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Premièrement, nous avons besoin de vérifier si l'ensemble des concepts de la physique classique que nous avons découverts jusqu'ici est complet. Les concepts de la physique classique peuvent-ils décrire *toutes* les observations ? La prochaine partie, quantique, de notre aventure est vouée à cette question. Notre deuxième devoir consiste à réduire cette liste. Cette tâche n'est pas immédiate, nous avons déjà découvert que la physique est fondée sur une définition qui se mord la queue : en physique galiléenne, l'espace et le temps sont définis en faisant appel à la matière, et la matière est définie par le biais de l'espace et du temps. Nous aurons besoin d'efforts plutôt conséquents pour surmonter cet écueil. La partie finale de ce texte raconte l'histoire précise. Suite à de nombreuses aventures, nous découvrirons réellement un concept fondamental sur lequel tous les autres concepts sont fondés.

Page 168

Nous pouvons résumer tous les résultats de la linguistique, mentionnés ci-dessus, de la manière suivante. En construisant une phrase composée uniquement d'un sujet, d'un verbe et d'un complément d'objet, faite seulement de noms et de verbes, en utilisant uniquement des concepts issus des primitives sémantiques, nous sommes certains qu'elle puisse être traduite dans toutes les langues. Ceci explique pourquoi les manuels de physique sont si souvent ennuyeux : les auteurs craignent trop souvent de s'éloigner de ce schéma fondamental. D'un autre côté, la recherche a montré que de telles déclarations directes ne sont pas restrictives : avec elles, nous pouvons dire tout ce qui peut être dit.

> « Chaque mot était au départ un poème. »
> Ralph Waldo Emerson*

Qu'est-ce qu'un concept ?

> « Les concepts sont uniquement les résultats, que le langage a permis de pérenniser, d'un processus antérieur de comparaison. »
> William Hamilton

Un groupe de personnes a poussé jusqu'à l'extrême le strict point de vue sur la traduction et sur la précision. Elles ont bâti tous les concepts à partir d'un ensemble encore plus petit de primitives, à savoir seulement deux : « ensemble » et « relation », et ont exploré les diverses combinaisons possibles de ces deux concepts, en observant leurs classifications. Pas à pas, ce groupe radical, couramment appelé *mathématiciens*, est parvenu à définir avec une précision absolue des concepts tels que les nombres, les points, les courbes, les équations, les groupes de symétrie et d'autres encore. La construction de ces concepts est partiellement résumée dans ce qui suit et se trouve en partie dans l'Annexe **??**.

Cependant, en dépit de cette précision compliquée, en fait précisément à cause d'elle, aucun concept mathématique ne traite de la nature ou des observations**. Par consé-

* Ralph Waldo Emerson (1803–1882), écrivain et philosophe américain.

** Dans la mesure où nous pouvons affirmer que les mathématiques sont fondées sur les concepts d'« ensemble » et de « relation », qui sont basés sur l'expérience, nous pouvons dire que les mathématiques explorent une partie de la réalité, et que ses concepts sont *dérivés* de l'expérience. On appelle *platonisme* ces points de vue ainsi que d'autres idées analogues concernant les mathématiques. Plus concrètement, le platonisme est l'idée selon laquelle les concepts des mathématiques existent *indépendamment* des gens, et qu'ils sont découverts, mais non inventés, par les mathématiciens.

En bref, puisque les mathématiques font usage du cerveau, lequel est un système physique, nous pouvons

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

quent l'étude du mouvement requiert d'autres concepts plus utiles. De quelles propriétés un concept utile devrait-il être doté ? Par exemple, qu'est-ce que la « passion » et qu'est-ce qu'un « coton-tige » ? Manifestement, un concept pratique implique l'existence d'une liste de ses parties, de ses aspects et de leurs relations internes, ainsi que de leur relation avec le monde extérieur. Les spécialistes de nombreux domaines, de la philosophie à la politique, s'accordent sur le fait que la définition de chaque *concept* exige :

— un contenu explicite et fixé,
— des limites explicites et fixées,
— un domaine d'application explicite et fixé.

L'incapacité à exprimer ces propriétés ou à les fixer est souvent la manière la plus facile de distinguer les *charlatans* des savants plus dignes de confiance. Des termes définis de manière floue, qui ne sont donc pas qualifiés de concepts, surgissent régulièrement dans les légendes, par exemple « dragon » ou « sphinx », ou dans les idéologies, comme « prolétaire » ou « âme ». Même la physique n'en est pas exempte. Notamment, nous découvrirons plus tard que ni l'« Univers » ni la « création » ne sont des concepts. Êtes-vous
Défi 212 s capable d'argumenter sur cette situation ?

Mais les trois propriétés déterminantes de chaque concept sont intéressantes en elles-mêmes. Le contenu explicite signifie que les concepts sont construits les uns à partir des autres. En particulier, les concepts les plus fondamentaux semblent être ceux qui n'ont aucune partie et aucune relation externe, mais seulement des relations internes. Pouvez-
Défi 213 s vous en citer un ? C'est seulement dans la dernière partie de cette promenade que nous dévoilerons le dernier mot sur ce sujet.

L'exigence de limites explicites et de contenus explicites implique également que tous les concepts qui décrivent la nature sont des *ensembles*, puisque les ensembles vérifient cette même condition. De surcroît, des domaines d'application explicites entraînent que tous les concepts sont aussi des *relations**. Puisque les mathématiques sont fondées sur les concepts d'« ensemble » et de « relation », nous en déduisons immédiatement que celles-ci peuvent définir la *forme* d'un concept quelconque, particulièrement à chaque fois qu'une précision élevée est exigée, comme dans l'étude du mouvement. Évidemment, le *contenu* de cette description est uniquement fourni par l'étude de la nature elle-même, ce n'est qu'alors que les concepts deviennent utiles.

Dans le cas de la physique, la quête de concepts suffisamment précis peut être vue comme l'unique fil conducteur qui structure la longue épopée de cette discipline. Régulièrement, de nouveaux concepts sont proposés, explorés sous toutes leurs coutures et testés. Finalement, ces concepts sont rejetés ou adoptés, de la même manière qu'un enfant adopte ou rejette un nouveau jouet. Les enfants le font de manière inconsciente, les scientifiques le font consciemment, par le biais du langage**. Pour cette raison, les

effectivement affirmer que *les mathématiques sont de la physique appliquée*.

* Nous voyons ainsi que chaque concept physique est un exemple de *catégorie* (mathématique), c'est-à-dire d'une combinaison d'objets et d'applications. Pour plus de détails concernant les catégories, notamment la définition précise de ce terme, lisez la page 185.

** Les concepts formés inconsciemment au cours de notre prime jeunesse sont les plus difficiles à définir précisément, c'est-à-dire avec le langage. Certaines personnes qui étaient incapables de les définir, tel le philosophe prussien Emmanuel Kant (1724–1804), avaient l'habitude de les qualifier de concepts « a priori » (comme l'« espace » et le « temps ») pour les différencier des concepts « a posteriori » définis plus clairement.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

concepts sont universellement intelligibles.

Remarquez que le concept de « *concept* » lui-même, n'est pas définissable indépendamment de l'expérience ; un concept est quelque chose qui nous aide à agir et réagir vis-à-vis du monde dans lequel nous vivons. Qui plus est, les concepts n'existent pas dans un monde distinct du monde physique : chaque concept fait appel à la mémoire de son utilisateur, puisque cet utilisateur doit se remémorer de quelle manière il a été formé. Par conséquent, chaque concept a besoin d'un support matériel pour son utilisation et son application. Donc toute réflexion et toute science sont fondamentalement basées sur l'expérience.

En conclusion, tous les concepts sont fondés sur l'idée que la nature est faite de parties en relation. Cette idée conduit aux couples complémentaires tels que « nom–verbe » en linguistique, « ensemble–relation » ou « définition–théorème » en mathématiques, et « aspect de la nature–modèle de la nature » en physique. Ces dualités guident constamment la pensée humaine, depuis l'enfance, comme la psychologie évolutive peut l'attester.

Que sont les ensembles ? Que sont les relations ?

> « Alles, was wir sehen, könnte auch anders sein. Alles, was wir überhaupt beschreiben können, könnte auch anders sein. Es gibt keine Ordnung der Dinge a priori*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.634

Définir les ensembles et définir les relations constituent les deux actions fondamentales de notre pensée. On peut s'en apercevoir de la manière la plus claire dans n'importe quel livre traitant de mathématiques : un tel ouvrage est généralement divisé en paragraphes intitulés « définition », « théorème », « lemme » et « corollaire ». Le premier type de paragraphe définit des concepts, c'est-à-dire qu'il définit des ensembles, et les trois autres types de paragraphes expriment des relations, c'est-à-dire qu'ils établissent des connexions entre ces ensembles. Les *mathématiques* sont donc l'exploration des concepts symboliques possibles et de leurs relations. Les mathématiques sont la science des nécessités symboliques.

Les ensembles et les relations sont les outils de la classification, c'est pourquoi ils représentent également les instruments de base de n'importe quel bureaucrate. (Regardez la Figure 84.) Cette classe d'êtres humains est caractérisée par un usage intensif de trombones, de dossiers, d'armoires métalliques, d'archives – qui définissent tous divers types d'ensembles – et par l'usage constant de numéros, tels que les références numériques, les numéros de clients, les numéros de passeport, les numéros de comptes, les numéros d'articles de loi – qui définissent les divers types de relations qui existent entre les composantes, c'est-à-dire entre les éléments de ces ensembles.

Les concepts d'ensemble et de relation expriment à la fois, de différentes façons, le fait que la nature peut être *décrite*, c'est-à-dire qu'elle peut être organisée en parties qui

Aujourd'hui, cette distinction s'est révélée non fondée à la fois par l'étude de la psychologie de l'enfant (voir la note de la page 163) et par la physique elle-même, de telle sorte que ces qualificatifs ne seront plus cités dans notre promenade.

* Tout ce que nous voyons pourrait être différent de ce qu'il est. Tout ce que nous pouvons décrire pourrait être radicalement différent de ce qu'il est. Il n'existe aucun ordre prédéfini des choses.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

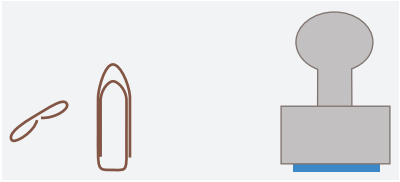


FIGURE 84 Outils permettant de définir des ensembles (à gauche) et des relations (à droite).

TABLEAU 19 Les propriétés déterminantes d'un ensemble – les axiomes ZFC.

AXIOMES DE LA THÉORIE DES ENSEMBLES DE ZERMELO–FRAENKEL–C
– Deux ensembles sont égaux si et seulement s'ils ont les mêmes éléments (axiome d'extensionnalité).
– L'ensemble vide est un ensemble (axiome de l'ensemble vide).
– Si x et y sont des ensembles, alors la paire $\{x, y\}$ est un ensemble (axiome de la paire).
– Si x est un ensemble d'ensembles, l'union de tous ses membres est un ensemble (axiome de la réunion).
– L'entité $\{\varnothing, \{\varnothing\}, \{\{\varnothing\}\}, \{\{\{\varnothing\}\}\}, \ldots\}$ est un ensemble [a] – autrement dit, les séries infinies, comme les entiers naturels, sont des ensembles (axiome de l'infini).
– Une entité définie par tous les éléments ayant une propriété donnée est un ensemble, à condition que cette propriété soit raisonnable ; quelques détails techniques importants qui définissent le terme « raisonnable » sont nécessaires (axiome de séparation).
– Si le domaine de définition d'une fonction est un ensemble, il en est de même pour son image (axiome de remplacement).
– L'entité y de tous les sous-ensembles de x est également un ensemble, appelé l'ensemble des parties (axiome de l'ensemble des parties).
– Un ensemble n'est pas élément de lui-même – plus quelques détails techniques (axiome de fondation).
– Le produit d'une famille d'ensembles non vides est non vide. De manière équivalente, le fait de sélectionner des éléments dans une liste d'ensembles nous permet de construire un nouvel ensemble – plus des détails techniques (axiome du choix).

a. La formulation la plus courante (bien qu'équivalente à celle donnée ci-dessus) est : l'entité $\{\varnothing, \{\varnothing\}, \{\varnothing, \{\varnothing\}\}, \{\varnothing, \{\varnothing\}, \{\varnothing, \{\varnothing\}\}\}, \ldots\}$ est un ensemble.

forment un tout. L'action de grouper des aspects de l'expérience, c'est-à-dire l'acte de les classifier, est exprimée en langage formel en disant qu'un ensemble est défini. Autrement dit, un *ensemble* est une collection d'*éléments* de notre pensée. Tout ensemble distingue chaque élément des autres éléments et de l'ensemble lui-même. Cette définition d'« ensemble » est dénommée la définition *approximative*. Pour la physique, cette définition est suffisante, mais vous ne rencontrerez pas beaucoup de gens qui admettent cela. En réalité, les mathématiciens ont peaufiné cette définition du concept d'« ensemble » à plusieurs reprises au cours du temps, parce que la définition approximative ne fonctionne pas très bien pour des ensembles infinis. Un exemple célèbre concerne l'histoire des ensembles qui ne se contiennent pas eux-mêmes. Manifestement, tout ensemble est de l'une ou l'autre de ces espèces : soit il se contient lui-même, soit il ne se contient pas. Si nous considérons l'ensemble de tous les ensembles qui *ne* se contiennent *pas* eux-mêmes, à

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 214 s quelle espèce celui-ci appartient-il ?

Pour esquiver tous les problèmes dus au concept d'« ensemble », les mathématiques ont besoin d'une définition précise. La première définition répondant à ce critère fut donnée par le mathématicien allemand Ernst Zermelo (n. Berlin 1871, d. -Fribourg-en-Brisgau 1951) et le mathématicien germano-israélien Adolf/Abraham Fraenkel (n. Munich 1891, d. -Jérusalem 1965). Par la suite, ce que nous appelons l'*axiome du choix* fut ajouté, afin de pouvoir manipuler une classe plus vaste d'ensembles infinis. Le résultat de ces efforts est appelé la définition *ZFC**. À partir de cette définition fondamentale, nous pouvons construire tous les concepts mathématiques utilisés en physique. D'un point de vue pratique, il est suffisant de garder à l'esprit que, pour la physique tout entière, la définition approximative d'un ensemble est équivalente à la définition précise ZFC, et même, en réalité, à la définition ZF, plus simple. Des subtilités ne surgissent que pour certains types particuliers d'ensembles infinis, mais ceux-ci ne sont pas utilisés en physique. En bref, à partir de la définition approximative et élémentaire de l'ensemble, nous pouvons bâtir tous les concepts utilisés en physique.

Réf. 165 La définition imparfaite de l'ensemble est loin d'être inintéressante. Pour satisfaire deux personnes lorsque nous partageons un gâteau, nous suivons cette règle : je coupe, tu choisis. Cette méthode possède deux propriétés : elle est *juste*, puisque chacun pense qu'il a la portion qu'il mérite, et elle est *pleinement satisfaisante*, puisque chacun a le sentiment d'avoir au moins autant que l'autre. Quelle règle est nécessaire pour trois personnes ? Et pour quatre ?

Défi 216 d

Hormis le fait de définir des ensembles, chaque enfant ou chaque intelligence crée des liens entre les différents aspects de l'expérience. Par exemple, lorsqu'il perçoit une voix, il fait automatiquement le rapprochement qu'un homme est présent. En langage formel, les connexions de ce type sont appelées *relations*. Les relations associent et différencient des éléments par un truchement différent des ensembles : les deux forment un couple complémentaire. La définition d'un ensemble rassemble de nombreux objets et en même temps les partage en deux camps : ceux qui appartiennent à cet ensemble et ceux qui n'y appartiennent pas ; la définition d'une relation (binaire) rassemble des éléments deux par deux et les partage en de nombreuses parties, à savoir les nombreux couples qu'elle définit.

Ensembles et relations sont des concepts étroitement reliés. En réalité, nous pouvons définir des relations (mathématiques) à l'aide des ensembles. Une *relation (binaire)* entre deux ensembles X et Y est un sous-ensemble de l'ensemble-produit, où l'*ensemble-produit* ou *produit cartésien* $X \times Y$ représente l'ensemble de tous les couples (x, y) avec $x \in X$ et $y \in Y$. Un *couple*, ou paire ordonnée, (x, y) peut facilement être défini à l'aide des ensembles. Pouvez-vous découvrir comment ? Par exemple, dans le cas de la relation

Défi 217 s

* Un aperçu général de la théorie axiomatique des ensembles est donné par Paul J. Cohen & Reuben Hersch, Non-Cantorian set theory, *Scientific American* **217**, pp. 104–116, 1967. C'était le temps où *Scientific American* était une revue de qualité.

Réf. 164 D'autres types d'entités, plus générales que les ensembles standards, vérifiant d'autres propriétés, peuvent aussi être définis, et font également l'objet d'une recherche mathématique (comparativement plus réduite).

Page 184 Pour en trouver un exemple, lisez la section sur les nombres cardinaux un peu plus loin. De telles entités plus générales sont appelées des classes à chaque fois qu'elles contiennent au moins un ensemble. Pouvez-vous en

Défi 215 s citer un exemple ? Dans l'ultime partie de notre ascension montagneuse, nous rencontrerons des concepts physiques qui ne sont décrits ni par des ensembles ni par des classes, et qui ne contiennent aucun ensemble.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

« est l'épouse de », l'ensemble X est l'ensemble de toutes les femmes et l'ensemble Y celui de tous les hommes ; la relation est donnée par la liste de tous les couples appropriés, laquelle est beaucoup plus petite que le produit cartésien, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les combinaisons possibles femme–homme.

Nous devons mentionner que la définition de la relation que nous venons de donner n'est pas vraiment complète, puisque toute construction du concept d'« ensemble » contient déjà certaines relations, telle la relation « est élément de ». Il semble qu'il ne soit pas possible de réduire complètement l'un des deux concepts « ensemble » ou « relation » à l'autre. Cette impossibilité se reflète dans les situations physiques d'ensemble et de relation, tels l'espace (comme un ensemble de points) et la distance, qui semblent aussi impossibles à séparer complètement l'un de l'autre. En d'autres termes, bien que les mathématiques ne soient pas concernées par la nature, ses deux concepts fondamentaux, ensemble et relation, sont empruntés à la nature. De surcroît, ces deux concepts, comme ceux d'espace-temps et de particules, sont définis chacun à l'aide de l'autre.

Infini

Les mathématiciens découvrirent immédiatement que le concept d'« ensemble » n'est utile que si nous pouvons également appeler des collections telles que $\{0, 1, 2, 3\ldots\}$, c'est-à-dire le nombre 0 et tous ses successeurs, un « ensemble ». Pour y parvenir, l'une des propriétés de la liste de Zermelo–Fraenkel qui définit le terme « ensemble » précise explicitement que cette collection peut être appelée un ensemble. (En fait, l'axiome du remplacement stipule aussi que les ensembles peuvent être infinis.) L'infini est donc introduit en mathématiques et dans les instruments de notre pensée directement depuis le début, dans la définition du mot « ensemble ». Lorsque nous décrivons la nature, avec ou sans les mathématiques, nous ne devrions jamais oublier cette conséquence. Quelques points supplémentaires concernant l'infini devraient faire partie du bagage culturel de chaque expert du mouvement.

Seuls les *ensembles* peuvent être infinis. Et les ensembles possèdent des composantes, à savoir leurs éléments. Lorsqu'une chose ou un concept est dit « infini », nous pouvons *toujours* nous demander et préciser ce que sont ses composantes : pour l'espace ce sont les points, pour le temps les instants, pour l'ensemble des entiers les entiers, etc. Une entité indivisible ou divisible de façon finie ne peut pas être qualifiée d'infinie*.

Un ensemble est infini s'il existe une fonction de celle-ci dans elle-même qui soit *injective* (c'est-à-dire que des éléments différents sont associés à des images différentes) mais pas *surjective* (c'est-à-dire que certains éléments n'apparaissent pas comme images d'éléments de départ). Par exemple, l'application $n \mapsto 2n$ montre que l'ensemble des entiers est infini. L'infini peut également être vérifié d'une autre manière : un ensemble est infini s'il demeure identique après suppression, même répétée, d'un élément. Nous avons juste besoin de nous rappeler que l'ensemble vide est *fini*.

Il existe de *nombreux types* d'infinis, tous de tailles différentes**. Cet important ré-

C'est là que nous commencerons vraiment à nous amuser.

* Par conséquent, la plupart des dieux, qui sont des concepts et donc des ensembles, sont soit finis soit, dans le cas où ils sont infinis, divisibles. Il semble que seules les conceptions polythéistes du monde ne soient pas perturbées par cette conclusion.

** En fait, il existe un nombre tellement énorme de types d'infinis qu'aucun de ces infinis ne décrit vraiment

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

sultat fut découvert par le mathématicien danois–russe–allemand Georg Cantor (1845–1918). Il montra qu'à partir de l'ensemble dénombrable des entiers naturels nous pouvons construire d'autres ensembles infinis qui ne sont pas dénombrables. Il fit cela en montrant que l'*ensemble des parties* $P(\omega)$, à savoir l'ensemble de tous les sous-ensembles, d'un ensemble infiniment dénombrable est infini, mais *pas* infiniment dénombrable. Pour le dire de façon plus abrupte, l'ensemble des parties d'un ensemble est « plus infini » que l'ensemble d'origine. Les nombres réels $\mathbb{R}$, qui seront bientôt définis, constituent un exemple d'ensemble infini indénombrable, il y en a beaucoup plus qu'il
Défi 218 s n'y a d'entiers naturels. (Pouvez-vous le démontrer ?) Cependant, *tout* type d'ensemble infini contient au moins un sous-ensemble qui est infiniment dénombrable.

Même pour un ensemble infini, nous pouvons définir la taille comme étant le nombre de ses éléments. Cantor appela cela le *cardinal* d'un ensemble. Le cardinal d'un ensemble fini est simplement donné par le nombre de ses éléments. Le cardinal d'un ensemble des parties de E est 2 exposant le cardinal de E. Le cardinal de l'ensemble des entiers
Page 293 est noté $\aleph_0$, prononcé « aleph zéro », d'après la première lettre de l'alphabet hébreu. Le cardinal *indénombrable* le plus petit est noté $\aleph_1$. Le cardinal suivant est noté $\aleph_2$, etc. Toute une branche des mathématiques est impliquée dans la manipulation de ces « nombres » infinis : addition, multiplication, exponentiation sont aisément définies. Pour certains d'entre eux, même les logarithmes et d'autres fonctions prennent leur sens*.

Les nombres cardinaux définis de cette manière, y compris $\aleph_n$, $\aleph_\omega$, $\aleph_{\aleph_\aleph}$, sont qualifiés d'accessibles, parce que depuis Cantor nous avons défini des types d'infinis encore plus grands, qualifiés d'*inaccessibles*. Ces nombres (les cardinaux inaccessibles, les cardinaux mesurables, les cardinaux supercompacts, etc.) requièrent la présence d'axiomes supplémentaires dans la théorie des ensembles, prolongeant ainsi le système ZFC. Comme les ordinaux et les cardinaux, ils constituent des exemples de ce que nous appelons des nombres *transfinis*.

Le cardinal de l'ensemble des nombres réels est égal à celui de l'ensemble des parties
Défi 219 s de l'ensemble des entiers, à savoir $2^{\aleph_0}$. Pouvez-vous montrer cela ? Ce résultat conduit à la célèbre question : Avons-nous $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$ ou non ? L'affirmation que c'est vrai, dénommée l'*hypothèse du continu*, est demeurée sans démonstration durant plusieurs générations. La réponse étonnante vint en 1963 : la définition usuelle du concept d'ensemble
Réf. 166 n'est pas assez explicite pour statuer sur cette question. En précisant le concept d'ensemble avec plus de détails, à l'aide d'axiomes supplémentaires – rappelez-vous que les axiomes sont des propriétés caractéristiques –, vous pouvez dévoiler que l'hypothèse du continu est soit vraie soit fausse, comme vous le voulez.

Un autre résultat de recherche concernant les nombres transfinis est primordial : pour chaque définition d'un type de cardinal infini, il semble être possible d'en découvrir un plus grand. Dans la vie quotidienne, l'idée d'infini est souvent utilisée pour mettre un terme à toute discussion sur la grandeur : « Mon grand frère est plus fort que le tien. » « Mais le mien est infiniment plus fort que le tien ! » Les mathématiques ont montré que les questions sur la taille persistent toujours après cela : « La force de mon frère est égale au cardinal de l'ensemble des parties de celui du tien ! » Rucker signale que les

ce nombre lui-même. Techniquement parlant, il existe autant d'infinis que de nombres ordinaux.

* De nombreux résultats sont résumés dans l'excellent et ravissant livre de poche de Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, Toronto, 1983.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Réf. 167 mathématiciens conjecturent qu'il n'existe aucune issue possible ni aucune fin concevable à ces discussions.

Pour les physiciens, une question élémentaire surgit immédiatement. Les quantités infinies existent-elles dans la nature ? Ou mieux, est-il nécessaire d'employer des quantités
Défi 220 e infinies pour décrire la nature ? Vous devriez pouvoir éclaircir votre opinion sur ce sujet. Cela sera définitivement tranché dans la suite de notre aventure.

Fonctions et structures

Quelles relations sont utiles pour décrire les modèles de la nature ? Un exemple typique est « plus les pierres sont grosses, plus elles sont lourdes ». Une telle relation est d'un type particulier : elle associe une valeur spécifique d'une observable « volume » à une valeur spécifique de l'observable « poids ». Une telle relation un-pour-un est appelée *fonction (mathématique)* ou *application*. Les fonctions représentent les types les plus précis de relations, elles transmettent ainsi un maximum d'informations. De la même manière que les nombres sont utilisés pour les observables, les fonctions permettent une communication facile et précise des relations qui existent entre les observations. Toutes les règles et les « lois » physiques sont par conséquent exprimées à l'aide de fonctions et, puisque les « lois » physiques ont rapport aux mesures, les fonctions numériques sont leurs principales briques fondatrices.

Une *fonction* f, ou *application*, est donc une relation binaire, c'est-à-dire un ensemble $f = \{(x, y)\}$ de couples, où pour chaque valeur du premier élément x, appelé *argument*, il n'existe qu'*un seul* couple (x, y). Le deuxième élément y est appelé la *valeur* de la fonction pour l'argument x. L'ensemble X de tous les arguments x est appelé le *domaine de définition* et l'ensemble Y de toutes les images y est appelé *ensemble d'arrivée* de la fonction. Au lieu de $f = \{(x, y)\}$, nous écrivons

$$f : X \to Y \quad \text{et} \quad f : x \mapsto y \quad \text{ou} \quad y = f(x) \,, \tag{78}$$

où le type de flèche – avec une barre au début ou non – indique si nous sommes en train de considérer des ensembles ou des éléments.

Nous remarquons qu'il est également possible d'utiliser la paire « ensemble » et « application » pour définir tous les concepts mathématiques ; dans cette situation une relation est définie à l'aide d'applications. Une école moderne de la pensée mathématique a formalisé cette approche par l'utilisation de *catégories* (mathématiques), un concept qui intègre à la fois les ensembles et les applications sur un même pied d'égalité, dans sa définition*.

Pour réfléchir et discuter plus clairement sur la nature, nous avons besoin de définir des concepts encore plus spécialisés que les ensembles, les relations et les fonctions, parce

* Une *catégorie* est définie comme étant une collection d'objets et une collection de « morphismes », ou d'applications. Les morphismes peuvent être composés, cette composition est associative et il existe un morphisme d'identité. Le monde étrange de la théorie des catégories, parfois appelée abstraction de toutes les abstractions, est présenté dans William Lawvere & Stephen H. Schanuel, *Conceptual Mathematics : a First Introduction to Categories*, Cambridge University Press, 1997.

Remarquez que chaque catégorie contient un ensemble ; puisqu'il n'est pas aisé de savoir si la nature contient des ensembles, comme nous en débattrons à la page 224, il est discutable d'affirmer que les catégories seront utiles dans l'unification de la physique, malgré le charme envoûtant de leur abstraction.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

que ces termes de base sont trop généraux. Les concepts les plus importants qui en sont dérivés sont les opérations, les structures algébriques et les nombres.

Une *opération (binaire)* est une fonction qui associe le produit cartésien de deux occurrences d'un ensemble X à lui-même. En d'autres termes, une opération w prend un couple d'arguments $x \in X$ et lui affecte une valeur $y \in X$:

$$w : X \times X \to X \quad \text{et} \quad w : (x, x) \mapsto y \,. \tag{79}$$

Défi 221 s La division entre des nombres est-elle une opération au sens que nous venons de définir ?

Maintenant, nous sommes prêts à définir le premier des trois concepts fondamentaux des mathématiques. Une *structure algébrique*, également appelée *système algébrique*, est (au sens le plus strict) un ensemble associé à certaines opérations. Les structures algébriques les plus importantes qui apparaissent dans la physique sont les groupes, les espaces vectoriels, et les algèbres.

Page ??

En plus des structures algébriques, les mathématiques sont fondées sur des *structures d'ordre* et sur des *structures topologiques*. Les structures d'ordre sont les éléments de base des nombres et sont nécessaires pour définir des comparaisons de toutes sortes. Les structures topologiques sont construites, via les sous-ensembles, sur le concept de voisinage d'un point. Elles sont nécessaires pour définir la continuité, les limites, le nombre de dimensions, les espaces topologiques et les variétés.

Page ??

Bien évidemment, la plupart des structures mathématiques sont des combinaisons de divers exemples de ces trois types de structures de base. Par exemple, le *système* des nombres réels est donné par l'*ensemble* des nombres réels et par les *opérations* d'addition et de multiplication, la *relation d'ordre* « est plus grand que » et la propriété de *continuité*. Elles sont donc bâties en combinant une structure algébrique, une structure d'ordre et une structure topologique. Rentrons un peu plus dans les détails.

Réf. 168

Les nombres

> « Quels nombres sont multipliés par six lorsque nous déplaçons leur dernier chiffre en première position ? »

Défi 222 s

Les nombres représentent le concept mathématique le plus ancien et on les rencontre dans toutes les cultures. La notion de nombre, en grec ἀριθμός, a varié à plusieurs reprises au cours de l'histoire. À chaque fois, le but était d'inclure des classes plus vastes d'objets, mais en conservant toujours l'idée générale que les nombres sont des entités qui peuvent être ajoutées, soustraites, multipliées et divisées.

La manière moderne d'écrire les nombres, comme dans $12\,345\,679 \cdot 54 = 666\,666\,666$, est essentielle pour la science*. Nous pouvons même avancer que l'absence de système efficace pour noter les nombres et pour les manipuler a retardé le progrès de la science de plusieurs siècles. (Par ailleurs, la même chose peut être affirmée concernant la reproduction de masse accessible des textes écrits.)

* Cependant, il n'y a aucune obligation d'écrire des nombres pour faire des mathématiques, comme l'indique Marcia Ascher, *Ethnomathematics – A Multicultural View of Mathematical Ideas*, Brooks/Cole, 1991.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les nombres les plus simples, 0, 1, 2, 3, 4... sont généralement perçus comme étant directement tirés de l'expérience. Néanmoins, ils peuvent aussi être construits à partir des notions de « relation » et d'« ensemble ». Une des nombreuses manières possibles d'y parvenir (pouvez-vous en trouver une autre ?) consiste à identifier un entier naturel avec l'ensemble de ses prédécesseurs. Avec la relation « successeur de », noté S, cette définition peut être écrite ainsi :

Défi 223 s

$$0 := \varnothing \quad , \quad 1 := S\,0 = \{0\} = \{\varnothing\} \quad ,$$
$$2 := S\,1 = \{0,1\} = \{\varnothing, \{\varnothing\}\} \quad \text{et} \quad n+1 := S\,n = \{0, \ldots, n\} \,. \tag{80}$$

Cet ensemble, associé aux opérations binaires « addition » et « multiplication », constitue le système algébrique $N = (N, +, \cdot, 1)$ des *entiers naturels*. Pour tous les systèmes de nombres, le système algébrique et l'ensemble sont souvent malencontreusement désignés par le même symbole. Le système algébrique N est un semi-anneau, comme il est expliqué dans l'Annexe ??. (Certains auteurs préfèrent ne pas compter le nombre zéro comme un entier naturel.) Les entiers naturels sont, honnêtement, très utiles.

Page ??

TABLEAU 20 Quelques grands nombres.

NOMBRE	EXEMPLE DANS LA NATURE
Autour de nous	
1	nombre d'anges qui peuvent se trouver en un lieu au même moment, d'après Thomas d'Aquin Réf. 169
8	nombre de fois qu'une feuille de journal peut être pliée dans des directions successivement perpendiculaires
12	nombre maximal de fois qu'une bande de papier a été pliée dans la même direction Réf. 170
20	nombre de chiffres, dans des mesures de précision, qui ne sera probablement jamais atteint
34, 55, 89	pétales des espèces communes de marguerites et de tournesols Réf. 171
57	facettes d'un diamant de taille brillant
2 000	étoiles visibles dans le ciel nocturne, en un lieu et à un instant donnés
15 000	nombre moyen d'objets dans un ménage européen
10^5	feuilles d'un arbre (hêtre de 10 m)
6 à $7 \cdot 10^9$	êtres humains en l'an 2000
10^{17}	fourmis dans le monde
env. 10^{20}	nombre de flocons de neige qui tombent sur la Terre chaque année
env. 10^{24}	grains de sable dans le désert du Sahara
10^{22}	étoiles dans l'Univers
10^{25}	cellules vivantes sur Terre
$1{,}1 \cdot 10^{50}$	atomes qui constituent la Terre ($6370^3\,\mathrm{km}^3 \cdot 4 \cdot 3{,}14/3 \cdot 5500\,\mathrm{kg/m}^3 \cdot 30\,\mathrm{mol/kg} \cdot 6 \cdot 10^{23}\,/\mathrm{mol}$)
10^{81}	atomes dans l'Univers visible
10^{90}	photons dans l'Univers visible
10^{169}	nombre d'atomes tenant dans l'Univers visible

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nombre	Exemple dans la nature
10^{244}	nombre de points de l'espace-temps dans l'Univers visible
Information	
51	record du nombre de langues parlées par une personne
env. 5 000	mots prononcés en moyenne par jour par un homme
env. 7 000	mots prononcés en moyenne par jour par une femme
env. 2 000 000	nombre de scientifiques sur Terre autour de l'an 2000
$3 \cdot 10^8$	mots prononcés pendant une vie (30 mots par minute, les 2/3 du temps éveillé)
10^9	mots entendus et lus pendant une vie
$4 \cdot 10^9$	impulsions échangées entre les deux hémisphères du cerveau chaque seconde
10^{17}	pixels d'images vus au cours d'une vie ($3 \cdot 10^9$ s $\cdot$ (1/15 ms) $\cdot$ 2/3 (éveillé) $\cdot 10^6$ (nerfs vers le cerveau) Réf. 172
10^{19}	bits d'information traités au cours d'une vie (la valeur ci-dessus fois 32)
env. $5 \cdot 10^{12}$	mots imprimés disponibles dans des livres (distincts) dans le monde (env. $100 \cdot 10^6$ livres constitués de 50 000 mots)
$2^{10} \cdot 3^7 \cdot 8! \cdot 12!$	
$= 4,3 \cdot 10^{19}$	positions possibles du Rubik's Cube $3 \times 3 \times 3$ Réf. 173
$5,8 \cdot 10^{78}$	positions possibles de l'analogue du Rubik's Cube $4 \times 4 \times 4$
$5,6 \cdot 10^{117}$	positions possibles de l'analogue du Rubik's Cube $5 \times 5 \times 5$
env. 10^{200}	parties possibles aux échecs
env. 10^{800}	parties possibles au jeu de go
env. 10^{10^7}	états possibles dans un ordinateur personnel
Nos constituants	
600	nombre de muscles du corps humain, parmi lesquels la moitié environ se situent dans le visage
150 000 ± 50 000	cheveux sur une tête en bonne santé
900 000	neurones dans le cerveau d'une sauterelle
$126 \cdot 10^6$	cellules sensibles à la lumière par rétine (120 millions de bâtonnets et 6 millions de cônes)
$300 \cdot 10^6$	respirations effectuées pendant la vie humaine
$500 \cdot 10^6$	clignements de l'œil pendant une vie (à peu près une fois toutes les quatre secondes à l'éveil)
$3 \cdot 10^9$	battements de cœur au cours d'une vie humaine
$3 \cdot 10^9$	lettres (paires de bases) dans l'ADN humain haploïde
$6,1 \cdot 10^9$	bits dans un CD
10^{10} à 10^{11}	neurones dans le cerveau humain
$1 \cdot 10^{11}$	êtres humains qui ont déjà vécu
$10^{15\pm1}$	cellules dans le corps humain
$10^{16\pm1}$	bactéries véhiculées par le corps humain
$> 10^{16}$	bits de mémoire dans le cerveau humain

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Le système des *entiers* $Z = (\ldots, -2, -1, 0, 1, 2, \ldots, +, \cdot, 0, 1)$ est l'anneau minimal qui soit une extension des entiers naturels. Le système des *nombres rationnels* $Q = (Q, +, \cdot, 0, 1)$ est le corps minimal qui soit une extension de l'anneau des entiers. (Les termes « anneau » et « corps » sont expliqués dans l'Annexe ??.) Le système des *nombres réels* $R = (R, +, \cdot, 0, 1, >)$ est l'extension minimale des rationnels qui soit continue et totalement ordonnée. (Pour la définition de la continuité, lisez les pages ?? et ??.) De manière équivalente, les réels représentent l'extension minimale des rationnels qui forme un corps complet, totalement ordonné et strictement archimédien. C'est la construction – ou définition – historique des nombres entiers, rationnels et réels faite à partir des entiers naturels. Toutefois, ce n'est pas la seule construction possible. La définition la plus merveilleuse de tous ces types de nombres est celle découverte en 1969 par John Conway, et vulgarisée par lui-même, Donald Knuth et Martin Kruskal :

Page ??

Réf. 174

— Un nombre est une succession de bits. Les deux bits sont généralement dénommés « haut » et « bas ». Des exemples de nombres et de la manière de les écrire sont fournis par la Figure 85.
— La succession vide représente le nombre zéro.
— Une succession finie de n hauts représente le nombre entier n, et une succession finie de n bas représente l'entier $-n$. Des successions finies de hauts et de bas mélangés fournissent les *nombres rationnels dyadiques*. Des exemples sont 1, 2, 3, −7, 19/4, 37/256, etc. Ils possèdent tous des dénominateurs ayant une puissance de 2. Les autres *nombres rationnels* sont ceux qui se terminent par une chaîne de hauts et bas qui se répète éternellement, tels les *réels*, les *infinitésimaux* et les nombres infinis simples. Des séries infinies dénombrables plus longues fournissent des nombres encore plus insensés. Le corps complet est appelé le corps des nombres *surréels**.

Il existe une deuxième manière d'écrire les nombres surréels. La première est la succession de bits qui vient d'être mentionnée. Mais, afin de définir l'addition et la multiplication, une autre notation est généralement utilisée, et déduite de la Figure 85. Un surréel α est défini comme étant le nombre qui apparaît en premier parmi tous ceux qui sont situés entre deux séries de premiers surréels, les séries de gauche et de droite :

$$\alpha = \{a, b, c, \ldots | A, B, C, \ldots\} \quad \text{avec} \quad a, b, c < \alpha < A, B, C\,. \tag{81}$$

Par exemple, nous avons

$$\begin{aligned} &\{0|\} = 1\,,\ \{0, 1|\} = 2\,,\ \{|0\} = -1\,,\ \{|-1, 0\} = -2\,,\ \{0|1\} = 1/2\,,\\ &\{0|1/2, 1/4\} = 1\,,\ \{0, 1, 3/2, 25/16\,|\,41/16, 13/8, 7/4, 2\} = 1 + 37/64\,, \end{aligned} \tag{82}$$

montrant que les surréels finis sont les *nombres dyadiques* $m/2^n$ (n et m étant des entiers). Étant donné deux surréels $\alpha = \{\ldots, a, \ldots | \ldots, A, \ldots\}$ sachant que nous avons $a < \alpha < A$ et $\beta = \{\ldots, b, \ldots | \ldots, B, \ldots\}$ avec $b < \beta < B$, l'addition est définie de manière récursive, en

* Les nombres surréels *ne* forment *pas* un ensemble puisqu'ils contiennent tous les *nombres ordinaux*, qui eux-mêmes ne forment pas un ensemble, bien qu'ils *contiennent* des ensembles, bien évidemment. En bref, les ordinaux et les surréels sont des classes qui sont *plus grandes* que les ensembles.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

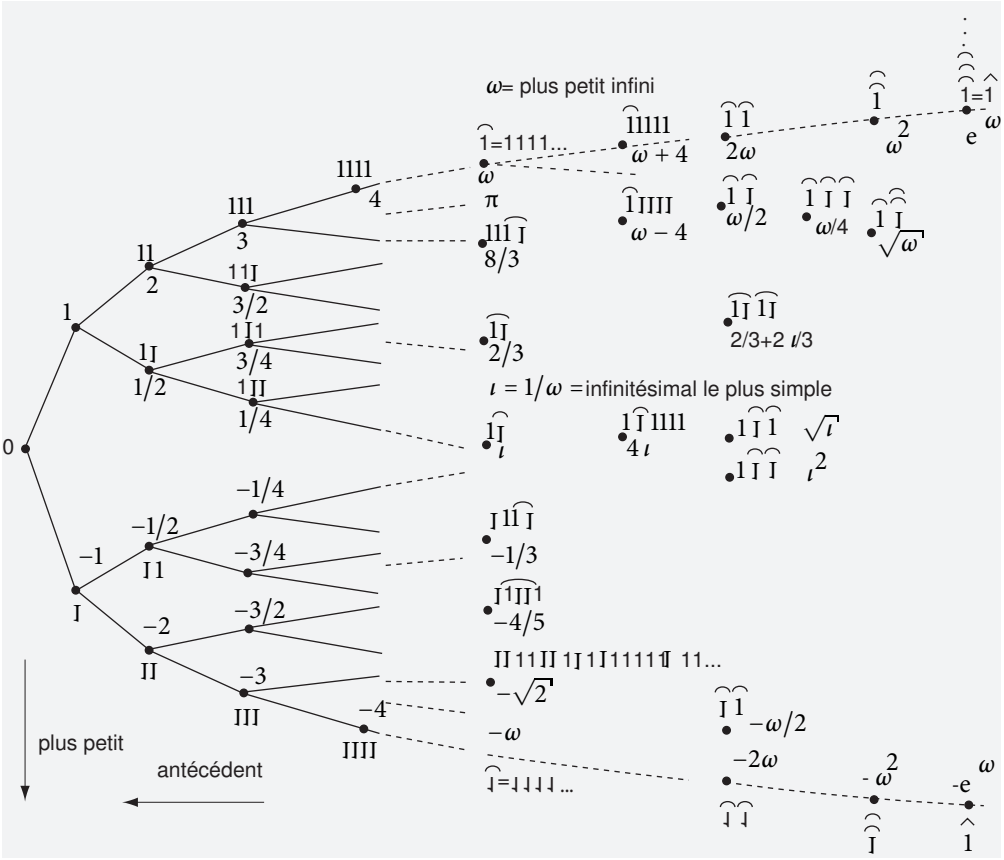


FIGURE 85 Les nombres surréels en notation conventionnelle et sous forme de bits.

utilisant les plus petits nombres déjà définis, comme

$$\alpha + \beta = \{..., a + \beta, ..., \alpha + b, ... | ..., A + \beta, ..., \alpha + B, ...\} \,. \tag{83}$$

Cette définition est employée simplement parce qu'elle donne les mêmes résultats que l'addition usuelle pour les entiers et les réels. Pouvez-vous le confirmer ? Par ailleurs, l'addition n'est pas toujours commutative. Êtes-vous capable de déceler les exceptions, et de découvrir la définition de la soustraction ? La multiplication est également définie de manière récursive, à savoir par l'expression

Défi 224 s

$$\begin{aligned}\alpha\beta = \{&..., a\beta + \alpha b - ab, ..., A\beta + \alpha B - AB, ... | \\ &..., a\beta + \alpha B - aB, ..., A\beta + \alpha b - Ab, ...\} \,.\end{aligned} \tag{84}$$

Ces définitions nous permettent d'écrire $\iota = 1/\omega$, et de discuter à propos de nombres tels que $\sqrt{\omega}$, la racine carrée de l'infini, à propos de $\omega + 4$, $\omega - 1$, 2ω, e^ω et à propos d'autres nombres étranges indiqués sur la Figure 85. Cependant, les nombres surréels ne sont pas couramment utilisés. Nous utilisons plus régulièrement un de leurs sous-ensembles.

Réf. 174

Les *nombres réels* sont les surréels dont la valeur n'est pas plus grande que l'infini

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

et qui ne possèdent pas des terminaisons périodiques dont la période est de longueur 1. Autrement dit, les surréels distinguent le nombre $0,9999999\overline{9}$ du nombre 1, alors que les réels ne le font pas. En réalité, entre les deux, il existe un nombre infiniment grand de nombres surréels. Pouvez-vous en citer quelques-uns ?

Défi 225 s

Les réels sont plus commodes pour décrire la nature que les surréels, premièrement parce qu'ils forment un ensemble – alors que ce n'est pas vrai pour les surréels – et deuxièmement parce qu'ils permettent la définition de l'intégration. D'autres nombres définis à l'aide des réels, par exemple les nombres complexes $\mathbb{C}$ et les quaternions $\mathbb{H}$, sont présentés dans l'Annexe **??**. Des systèmes numériques un peu plus élaborés y sont également exposés.

Appendix **??**

Pour conclure, en physique nous appelons couramment *nombres* les éléments de tout ensemble qui est un semi-anneau (par exemple $\mathbb{N}$), un anneau (par exemple $\mathbb{Z}$) ou un corps ($\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ ou $\mathbb{H}$). Tous ces concepts sont définis dans l'Annexe **??**. Puisque les nombres nous permettent de comparer des grandeurs et donc de mesurer, ils jouent un rôle crucial dans la description des observations.

> « Une série de boules identiques est emballée de telle sorte que la surface nécessaire de papier cadeau soit minimale. Pour des petits nombres de boules, l'emballage linéaire, avec toutes les boules alignées, est le plus efficace. Pour quel nombre de boules cet emballage n'est-il plus un minimum ? »

Réf. 175

Défi 226 s

Pourquoi faire des mathématiques ?

> « Die Forderung der Möglichkeit der einfachen Zeichen ist die Forderung der Bestimmtheit des Sinnes*. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.23

Plusieurs physiciens très connus se sont demandé à plusieurs reprises pourquoi les mathématiques sont si importantes. Par exemple, on cite que Niels Bohr a dit : « Nous ne comprenons pas pourquoi le langage des mathématiques a été si efficace pour exprimer ces lois dans leur forme la plus concise ». Eugene Wigner a écrit un article, fréquemment cité, intitulé *La déraisonnable efficacité des mathématiques*. À l'aube de la science, de nombreux siècles plus tôt, Pythagore et ses contemporains étaient si déconcertés par l'utilité des nombres dans la description de la nature, que Pythagore parvint à mettre sur pied une organisation secrète fondée sur cette correspondance. Les membres du cercle d'initiés de cette secte étaient baptisés les « érudits », en grec « *mathématiciens* », d'après la racine grecque μάθημα « enseigner ». Cette dénomination sectaire devint alors la désignation de la profession moderne.

Réf. 176

Réf. 177

Ces personnalités avaient oublié que les nombres, ainsi qu'un vaste pan des mathématiques, sont des concepts développés précisément dans le but de décrire la nature. Les nombres et les concepts mathématiques furent directement développés, dès le départ,

* L'exigence que les signes simples soient possibles découle de l'exigence que la signification doive être déterminée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pour en fournir une description aussi succincte que possible. C'est en conséquence que les mathématiques représentent la science des exigences symboliques.

Peut-être avons-nous été trop impartiaux. Peut-être que ces penseurs désiraient principalement exprimer leur sentiment d'émerveillement lorsqu'ils se rendaient compte que ce langage fonctionne admirablement bien, que la pensée et notre cerveau vont de l'avant, et que la vie et la nature sont si magnifiques. Cela pourrait rendre la question du titre de ce paragraphe plus proche de la célèbre déclaration d'Albert Einstein : « La chose la plus incompréhensible à propos de l'Univers est qu'il soit compréhensible ». La compréhension est un autre terme pour parler de la description, c'est-à-dire de la classification. Évidemment, tout système divisible est compréhensible, et il n'y a rien d'étrange à son propos. Mais l'Univers est-il divisible ? Tant qu'il est décrit comme étant constitué de particules et de vide, c'est effectivement le cas.

Nous découvrirons dans la dernière partie de cette aventure que l'hypothèse de base faite lors de notre départ est construite sur des fondements instables. La supposition que les observations dans la nature peuvent être *mesurées*, et donc que la nature est divisible, est une approximation. L'« incompréhensibilité » mentionnée devient stupéfaction au vu de la précision de cette approximation. Néanmoins, la secte de Pythagore, qui était fondée sur l'idée que « toute chose dans la nature est représentée par des nombres », avait tort. Comme pour tant de croyances, l'observation montrera que tout cela était faux.

> Die Physik ist für Physiker viel zu schwer*.
> David Hilbert

Les mathématiques sont-elles un langage ?

> Die Sätze der Mathematik sind Gleichungen, also Scheinsätze. Der Satz der Mathematik drückt keinen Gedanken aus**.
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.2, 6.21

Assurément, les mathématiques constituent un *vocabulaire* qui nous permet de discuter avec précision. Les mathématiques peuvent être vues comme l'exploration de *tous* les concepts possibles qui peuvent être construits à partir des deux briques fondamentales « ensemble » et « relation » (ou certaines autres paires équivalentes). Les *mathématiques* sont la science des exigences symboliques. Reformulé autrement, les mathématiques sont l'exploration de tous les types possibles de classifications. Cela explique son utilité dans toutes les situations où des classifications complexes, quoique précises, des observations sont nécessaires, comme en physique.

Toutefois, les mathématiques ne peuvent pas exprimer toutes les choses que les hommes veulent communiquer, telles que les espérances, les opinions ou les émotions. Essayez simplement d'exprimer le plaisir de la natation à l'aide des mathématiques. En réalité, *les mathématiques sont la science des exigences symboliques*, donc les mathématiques ne sont pas un langage, pas plus qu'elles n'en contiennent un. Les concepts mathématiques, étant fondés sur des ensembles et des relations *abstraites*, ne se rapportent pas

* La physique est trop difficile pour être laissée aux physiciens.

** Les propositions des mathématiques sont des équations, et par conséquent ce sont des pseudo-propositions. Une proposition des mathématiques n'exprime aucune pensée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

à la nature. Malgré leur beauté, les mathématiques ne nous permettent pas de parler de la nature ou des observations sur le mouvement. Les mathématiques ne nous enseignent pas *ce qu'il* faut dire concernant la nature, elles nous enseignent *comment* il faut le dire.

Dans sa célèbre conférence de 1900 à Paris, le mathématicien allemand David Hilbert* donna une liste de 23 grands défis qu'affrontaient les mathématiques. Le sixième des problèmes de Hilbert consistait à découvrir un traitement mathématique des axiomes de la physique. Notre aventure jusqu'ici a montré que la physique a débuté avec des définitions *circulaires* qui n'ont pas encore été éliminées après 2 500 années de recherches : l'espace-temps est défini par le truchement des objets et les objets sont définis à l'aide de l'espace et du temps. Étant basée sur une définition circulaire, la physique *n'est* donc *pas* modélisée par les mathématiques, même si de nombreux physiciens et mathématiciens, y compris Hilbert, auraient aimé qu'il en soit ainsi. Les physiciens doivent vivre avec des obstacles logiques et doivent progresser sur un terrain incertain dans le but de réaliser des avancées. En fait, ils ont fait ainsi durant 2 500 ans. Si la physique était un système axiomatique, elle ne renfermerait aucune contradiction ; d'autre part, elle cesserait d'être un langage et s'arrêterait de décrire la nature. Nous reviendrons sur ce problème plus tard.

Page 168 Réf. 178 Page ??

Curiosités et défis amusants sur les mathématiques

Quel est le plus grand nombre qui peut être écrit avec quatre chiffres 2 et aucun autre symbole ? Et avec quatre 4 ?

Défi 227 s

* *

Les triplets pythagoriciens sont les entiers qui vérifient la relation $a^2 + b^2 = c^2$. Donnez-en au moins dix exemples. Montrez alors les trois propriétés suivantes : au moins un nombre dans un triplet est un multiple de 3, au moins un nombre dans un triplet est un multiple de 4, au moins un nombre dans un triplet est un multiple de 5.

Défi 228 e

* *

Une mère a 21 ans de plus que son enfant et, dans 6 ans, l'enfant sera 5 fois plus jeune que sa mère. Où est le père ? C'est l'*énigme de la jeune mère*.

Défi 229 s

* *

Le nombre $1/n$, lorsqu'il est écrit en notation décimale, possède une succession périodique de chiffres. Cette période possède au maximum $n - 1$ chiffres, comme pour

* David Hilbert (n. Königsberg 1862, d. -Göttingen 1943), qui fut professeur de mathématiques à Göttingen, était considéré comme le plus grand mathématicien de son époque. Il fut une personnalité centrale dans de nombreuses parties des mathématiques, et joua également un rôle important à la fois dans la naissance de la relativité générale et dans celle de la théorie quantique. Ses ouvrages sont toujours imprimés. Sa célèbre conviction personnelle était : « Wir müssen wissen, wir werden wissen. » (Nous devons savoir, nous saurons.) Sa célèbre conférence à Paris est publiée par exemple dans *Die Hilbertschen Probleme*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1983. Cette conférence donna un coup de fouet aux mathématiques. (Malgré des efforts et des promesses de gloire identique, *personne* dans le monde n'eut une vision similaire des mathématiques qui lui aurait permis de reproduire cette prouesse en l'an 2000.) Dans sa dernière décennie, il endura la persécution du régime nazi, cette oppression évinça Göttingen de la liste des importantes universités scientifiques, sans jamais retrouver, jusqu'à ce jour, la place qu'elle avait alors.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

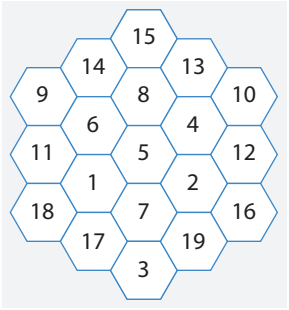


FIGURE 86 Le seul hexagone magique (jusqu'aux réflexions et rotations) commençant avec le nombre 1.

$1/7 = 0,142857\,142857\,1428\ldots$ Quels autres nombres $1/n$ possèdent des périodes de longueur $n-1$? Défi 230 d

* *

Felix Klein était un professeur de mathématiques notoire de l'université de Göttingen. Il y avait deux types de mathématiciens dans son département : ceux qui menaient des recherches sur tout ce qu'ils voulaient et ceux pour lesquels Klein fournissait des sujets de recherche. À quelle catégorie Klein appartenait-il ? Défi 231 s

Cela est manifestement une variante d'une autre énigme célèbre. Un barbier rase tous les habitants d'une ville qui ne se rasent pas eux-mêmes. Le barbier se rase-t-il ? Défi 232 s

* *

Tout le monde sait ce qu'est un *carré magique* : un tableau carré de nombres, allant de 1 à 9 dans le cas le plus simple, qui sont distribués de telle manière que la somme de toutes les lignes, colonnes (et accessoirement toutes les diagonales) donne le même total. Pouvez-vous écrire le *cube magique* $3 \times 3 \times 3$ le plus simple ? Défi 233 s

* *

Les chiffres de 0 à 9 sont agencés sur les claviers de deux manières différentes. Les calculatrices et les claviers d'ordinateurs ont le 7 en haut à gauche, alors que les téléphones et les guichets automatiques bancaires ont le chiffre 1 en haut à gauche. Les deux standards, dus respectivement à l'Organisation internationale de normalisation (International Standards Organization, ISO) et à l'Union internationale des télécommunications (International Telecommunication Union ITU, autrefois CCITT), ont évolué séparément et ne sont jamais parvenus à fusionner. Réf. 179

* *

Leonhard Euler écrivait parfois dans ses notes des équations telles que

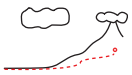
$$1 + 2^2 + 2^4 + 2^6 + 2^8 + \ldots = -\frac{1}{3}\,. \tag{85}$$

Cela peut-il être raisonnable ? Défi 234 d

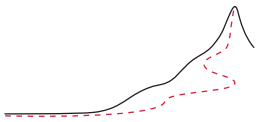
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Dans l'histoire des mathématiques récréatives, plusieurs personnes ont découvert indépendamment le célèbre hexagone magique indiqué à la Figure 86. Le premier découvreur fut, en 1887, Ernst von Hasselberg. Cet hexagone est dit magique parce que toutes les lignes s'additionnent pour faire le même nombre, 38. Hasselberg démontra également le résultat presque incroyable qu'il n'existe aucun autre hexagone magique.



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



Chapitre 10

CONCEPTS, MENSONGES ET MODÈLES DE LA NATURE

> Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt*.
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.6

> Der Satz ist ein Bild der Wirklichkeit. Der Satz ist ein Modell der Wirklichkeit, so wie wir sie uns denken**.
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.01

Réf. 180

Contrairement aux mathématiques, la physique aspire à être un langage. À travers la description du mouvement, elle vise à exprimer *tout* ce qui est observé et, en particulier, tous les exemples et possibilités de changement***. Comme tout langage, la physique est constituée de concepts et de phrases. Afin de pouvoir tout exprimer, elle doit chercher à employer quelques mots seulement pour décrire une grande quantité de faits****. Les physiciens sont essentiellement des personnes *fainéantes* : ils tentent de minimiser l'effort dans tout ce qu'ils entreprennent. Les concepts employés aujourd'hui ont été optimisés par l'effort combiné de nombreuses personnes pour être aussi pratiques, c'est-à-dire aussi puissants, que possible. Un concept est qualifié de *puissant* lorsqu'il nous permet d'exprimer d'une manière concise une grande quantité d'information, signifiant qu'il

* Les frontières de mon langage sont les frontières de mon univers.

** La proposition est une image de la réalité. La proposition est un modèle de la réalité, telle que nous l'imaginons.

*** Toutes les observations concernent le changement ou la variation. Les divers types de changement sont étudiés par les diverses sciences : elles sont généralement regroupées dans les trois catégories suivantes : *sciences humaines*, *sciences formelles* et *sciences naturelles*. Parmi cette dernière, les plus anciennes sont l'astronomie et la science des métaux. Avec l'accroissement de la curiosité au début de l'Antiquité, apparut alors la science naturelle relative à l'étude du mouvement : la *physique*. Au cours de notre promenade, il deviendra clair que cette définition apparemment restrictive recouvre en réalité l'intégralité des domaines étudiés en physique. En particulier elle intègre la définition plus courante de la physique comme étant l'étude de la matière, de ses propriétés, de ses constituants et de leurs interactions.

**** Une observation spécifique, particulière, c'est-à-dire un exemple particulier d'information partagée par plusieurs personnes, est appelée un *fait* ou, dans d'autres contextes, un *événement*. Un fait saisissant et régulièrement observé est appelé un *phénomène*, et une observation générale faite dans de nombreuses situations distinctes est appelée un *principe (physique)*. (Souvent, lorsqu'un concept introduit est employé dans d'autres domaines avec des significations différentes, il sera suivi dans cette excursion du qualificatif « physique » ou « mathématique », entre parenthèses.) Les actions réalisées dans le but de collecter des observations sont appelées des *expériences*. Le concept d'expérience s'est établi au cours du seizième siècle. C'est pendant l'évolution d'un enfant qu'il peut le mieux être comparé à cette activité qui possède le même objectif de collecte d'expériences : *jouer*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

peut rapidement transmettre une foule de détails concernant les observations.

Les formulations générales au sujet de nombreux exemples de mouvement sont appelées *règles* ou *modèles*. Par le passé, nous disions souvent que « les lois gouvernent la nature », employant par là une vieille idéologie qui ne convient pas. Une « loi » physique est uniquement une manière de dire le plus de choses possibles avec le moins de mots possibles. Lorsque nous disons « les lois gouvernent la nature », nous voulons en réalité dire « étant fainéants, nous décrivons les observations à l'aide de modèles ». Les lois représentent l'archétype de la fainéantise. La formulation des lois est de la pure paresse. En réalité, l'expression correcte est *les modèles décrivent la nature*.

Les physiciens ont défini la paresse nécessaire pour leur discipline avec beaucoup de soin. Pour devenir un roi de la paresse, nous avons besoin de discerner les modèles oisifs de ceux qui ne le sont pas, comme les mensonges, les croyances, les déclarations qui ne concernent pas les observations, et les affirmations qui n'ont pas trait au mouvement. Nous allons le faire plus loin.

Page 201

Le principe de la paresse extrême est à l'origine, entre autres, de l'usage des nombres en physique. Les observables sont souvent mieux décrites à l'aide de nombres, parce que ceux-ci permettent une communication et une classification faciles et précises. La longueur, la vitesse, les angles, la température, la tension ou l'intensité d'un champ sont de ce type. La notion de « nombre », employée dans chaque mesure, est construite, souvent inconsciemment, à partir des notions d'« ensemble » et de « relation », comme nous l'avons montré ci-dessus. Hormis la notion de nombre, d'autres concepts sont régulièrement définis pour permettre une communication rapide et concise concernant les « lois » de la nature, ils sont tous des « instruments de notation ». En ce sens, l'affirmation que « le degré de l'algèbre de Kac–Moody du lagrangien du modèle des supercordes hétérotiques est égal à un » contient une information précise, explicable à quiconque. Toutefois, il faudrait une douzaine de pages pour l'exprimer en utilisant uniquement les termes « ensemble » et « relation ». En bref, la *précision* commune en physique est issue de sa *quête de paresse*.

> « Es ist besser, daß die Leute nicht wissen, wie Gesetze und Wurst zustande kommen. Sonst könnten sie nachts nicht ruhig schlafen*. »
>
> Otto von Bismarck

Les concepts physiques sont-ils découverts ou inventés ?

> « Das logische Bild der Tatsachen ist der Gedanke**. »
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3

Ce titre sous forme d'interrogation est souvent reformulé ainsi : les concepts physiques sont-ils affranchis de toutes croyances, goûts ou choix personnels ? Cette question a été tant débattue qu'elle apparaît même dans les films d'Hollywood. Nous en donnons un bref résumé, qui peut vous aider à reconnaître les honnêtes enseignants de ceux qui sont malhonnêtes.

* « Il est préférable que les gens ne sachent pas comment les lois et les saucisses sont confectionnées. Sinon ils ne dormiraient pas de la nuit. » Otto von Bismarck (1815–1898), chancelier prussien.
** L'image logique des faits, c'est la pensée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'invention des concepts, contrairement à leur découverte, impliquerait le libre choix parmi de nombreuses possibilités. Le choix effectué serait alors dû aux croyances ou aux sentiments ressentis par cette personne. En physique (en contraste flagrant avec les autres domaines de recherche plus idéologiques), nous savons que des descriptions physiques différentes des observations sont soit équivalentes soit, dans le cas opposé, imprécises, voire erronées. Une description des observations est donc essentiellement unique : n'importe quel choix de concepts n'est qu'apparent. Il n'y a aucune véritable liberté dans la définition des concepts physiques. Selon cette propriété, la physique est en parfaite contradiction avec l'activité artistique.

Si deux concepts distincts peuvent être utilisés pour décrire le même aspect des observations, ils doivent être équivalents, même si la relation qui conduit à cette équivalence n'est pas perçue immédiatement. En réalité, la condition nécessaire que des individus ayant des points de vue différents et qui observent le même événement en déduisent des descriptions équivalentes est liée au fondement même de la physique. Elle exprime la nécessité que les observations sont indépendantes de l'observateur. En bref, l'exigence forte d'indépendance de point de vue fait que le libre choix des concepts est une impossibilité logique.

La conclusion que les concepts qui décrivent les observations sont découverts plutôt qu'inventés est également formulée indépendamment dans le domaine de la linguistique par la recherche mentionnée ci-dessus sur les primitives sémantiques*, dans le domaine de la psychologie par les observations sur la formation des concepts lors du développement des jeunes enfants, et dans le domaine de l'éthologie par les observations du développement chez l'animal, particulièrement dans le cas des mammifères. Dans ces trois domaines, des observations méticuleuses ont été réalisées sur la manière dont les interactions entre un être humain et son environnement font émerger des concepts, parmi lesquels ceux qui sont les plus élémentaires, comme l'espace, le temps, l'objet ou l'interaction, sont communs à tous les sexes, toutes les cultures, les races et à de nombreuses espèces animales qui peuplent le monde. La curiosité et la manière dont la nature fonctionne conduisent aux mêmes concepts pour tous les individus et même les animaux ; le monde n'offre qu'une seule possibilité, sans laisser de place à l'imagination. Envisager que les concepts physiques puissent être inventés pendant votre temps libre est une croyance – ou un exercice utile, qui ne réussit jamais.

Les concepts physiques sont des classifications des observations. L'action de classifier suit elle-même les modèles de la nature, c'est un processus mécanique que les machines peuvent également accomplir. Cela signifie que toute distinction, c'est-à-dire toute affirmation que A est différent de B, est une formulation libre de toute théorie. Aucun système de croyance n'est nécessaire pour distinguer des entités différentes dans la nature. Les chats et les cochons peuvent également le faire. Les physiciens *peuvent* être remplacés par des animaux, ou même par des machines. Notre ascension montagneuse confirmera à plusieurs reprises cette idée.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les concepts physiques les plus répandus permettent de décrire les observations aussi succinctement et aussi fidèlement que possible.

* Anna Wierzbicka a conclu que ses recherches indiquent clairement que les primitives sémantiques sont *découvertes*, en particulier qu'elles sont déduites à partir des fondamentaux de l'expérience humaine, et non inventées. Réf. 163

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Ils sont formés dans le but d'avoir la compréhension la plus vaste possible avec la plus petite quantité d'effort possible. Le rasoir d'Occam – l'exigence de ne pas introduire de
Page ?? concepts superflus – et la motivation de l'unification réduisent automatiquement, tous les deux, le nombre et les types de concepts utilisés en physique. Autrement dit, l'essor de la science physique a été et est fondé sur un programme qui réduit les choix envisageables de concepts aussi rigoureusement que possible.

En résumé, nous découvrons que les concepts physiques sont les mêmes pour tout le monde et sont indépendants des croyances et des choix personnels : ils sont avant toute chose *ennuyeux*. Qui plus est, puisqu'ils peuvent provenir des machines au lieu des individus, ils sont *nés de la paresse*. Malgré ces analogies humaines – ce qui signifie qu'ils ne doivent pas être pris trop au sérieux – les concepts physiques *ne* sont *pas* inventés, ils sont découverts. Si un enseignant vous affirme le contraire, il est en train de mentir.

Comme nous avons traité le cas des concepts physiques, tournons-nous dorénavant vers les déclarations physiques. La situation est quelque peu similaire : les déclarations physiques doivent être paresseuses, arrogantes et ennuyeuses. Voyons pourquoi.

> « Wo der Glaube anfängt, hört die Wissenschaft auf*. »
> Ernst Haeckel, *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, 1879.

Comment découvrons-nous les règles et les modèles de la physique ?

> « Grau, treuer Freund, ist alle Theorie,
> Und grün des Lebens goldner Baum**. »
> J.W. v. Goethe, *Faust*.

> « La physique est généralement présentée comme une science objective, mais je fais remarquer que la physique change alors que le monde reste le même, il doit donc y avoir quelque chose de subjectif dans la physique. »
> Richard Bandler

La progression dans l'étude du mouvement rappelle l'attitude d'un jeune enfant face à la vie. Cette avancée suit le programme élémentaire situé à gauche du Tableau 21.

Les scientifiques adultes n'ont pas grand-chose à ajouter, excepté les termes plus conventionnels indiqués à droite, plus quelques professions spécialisées qui en tirent profit. Les experts de l'étape 7 sont indifféremment nommés lobbyistes ou quêteurs ; au lieu d'appeler ce programme « curiosité », ils l'appellent la « méthode scientifique ». Ils discutent beaucoup. La physique étant la discussion concernant le mouvement***, et le mou-

* La croyance commence là où la raison s'arrête.

** « Mon bon ami, toute théorie est sèche, et l'arbre précieux de la vie est fleuri. » Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832), est le poète allemand le plus important.

*** Plusieurs sciences possèdent le terme « discuter » dans une racine de leur nom, à savoir toutes celles dont le nom se termine par « -logie », comme la biologie. Ce suffixe provient du grec ancien et découle de λήγην signifiant « parler, discuter ». La physique comme science du mouvement pourrait donc être appelée « cinésiologie » d'après κίνησις, qui signifie « mouvement ». Mais, pour des raisons historiques, ce terme a eu une signification différente, à savoir l'étude de l'activité musculaire humaine. Le mot « physique » est soit

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 21 La « méthode scientifique ».

Description normale **Curiosité**	Description lobbyiste **Méthode scientifique**
1. observer énormément autour de soi	1. interagir avec le monde
2. ne pas croire tout ce qui est dit	2. faire fi de l'autorité
3. choisir quelque chose d'intéressant et l'explorer tout seul	3. observer
4. construire votre propre opinion et décrire précisément ce que vous voyez	4. faire appel à la raison, construire des hypothèses
5. vérifier si vous pouvez aussi décrire de la même manière des situations similaires	5. analyser les hypothèses
6. accroître la précision de l'observation jusqu'à ce que les vérifications échouent ou soient complètes	6. réaliser des expériences jusqu'à ce qu'on démontre que les hypothèses sont fausses ou fondées
7. en fonction de la situation, continuer avec les étapes 4 ou 1	7. demander plus d'argent

vement étant un vaste sujet, de nombreux individus se sont spécialisés dans cette étape.

Les experts de l'étape 6 sont appelés *physiciens expérimentateurs* ou plus simplement *expérimentateurs*, un terme dérivé du latin « *experiri* », qui signifie « tester ». La majorité d'entre eux représente une partie de la catégorie des « étudiants diplômés ». Les experts des étapes 5 et 4 sont appelés *physiciens théoriciens* ou plus simplement *théoriciens**. C'est une désignation plutôt récente, et le premier professeur de physique théorique, par exemple, fut nommé autour du début du vingtième siècle. Ce terme est dérivé du grec θεωρία qui signifiant « observation, méditation ». Finalement, il y a les gens qui se focalisent sur les étapes 1 à 3, et qui amènent les autres à travailler sur les étapes 4 à 6, ils sont appelés *génies*.

Manifestement, un point primordial est dissimulé dans l'étape 6 : comment tous ces gens savent-ils si leurs expériences échouent ? Comment reconnaissent-ils la vérité ?

> « Toutes les professions sont des conspirations contre les profanes. »
>
> George Bernard Shaw

dérivé du grec φύσικη (τέχνη est mieux compris) qui veut dire « (la science de) la nature », soit tiré du titre de l'œuvre d'Aristote τά φυσικά qui signifie « les choses naturelles ». Ces deux expressions sont dérivées de φύσις, signifiant « nature ».

* Si vous aimez la physique théorique, jetez un œil sur la page Web rafraîchissante et accessible du lauréat du prix Nobel Gerard 't Hooft sous le titre *How to become a good theoretical physicist*. Elle peut être consultée sur www.phys.uu.nl/~thooft/theorist.html.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Qu'est-ce qu'un mensonge ?

> « Établissez d'abord soigneusement les faits. Après quoi, vous pourrez les déformer comme bon vous semble. »
>
> Mark Twain

> « La vérité pure est toujours un mensonge. »
>
> Bert Hellinger

Les mensonges sont des formulations très pratiques, comme chacun l'apprend au cours de sa jeunesse. Une raison pour laquelle ils sont commodes, c'est que nous pouvons esquisser n'importe quelle conclusion imaginable à partir d'eux. Une discussion très célèbre entre deux professeurs de Cambridge au début du vingtième siècle l'établit clairement. McTaggart demandait : « Si 2 + 2 = 5, comment pouvez-vous démontrer que je suis le pape ? » Godfrey Hardy : « Si 2 + 2 = 5, alors 4 = 5, défalquez 3, alors 1 = 2, mais McTaggart et le pape sont deux, par conséquent McTaggart et le pape sont un ». Comme il a été mentionné depuis longtemps, *ex falso quodlibet* : à partir de ce qui est faux, tout ce qui est imaginable peut être inféré. Il est vrai que, dans notre ascension montagneuse, nous avons besoin de construire des arguments à partir des résultats précédemment déduits, et que notre voyage ne pourra s'achever si nous avons commis une erreur quelque part dans notre chapelet d'arguments. Mais mentir représente une activité si importante que nous devons apprendre à bien le faire.

Réf. 144

Il existe diverses étapes dans l'art de mentir. De nombreux animaux ont été vus en train de tromper leurs proches. Les enfants commencent à mentir juste avant leur troisième anniversaire, en dissimulant des choses. Les adultes fraudent sur les impôts. Et un grand nombre d'intellectuels ou d'hommes politiques proclament même que la vérité n'existe pas.

Cependant, dans la plupart des pays, tout le monde doit savoir ce qu'est la « vérité », puisque dans un tribunal par exemple, ne pas dire la vérité peut conduire à une peine d'emprisonnement. Les tribunaux sont emplis d'experts dans la détection du mensonge. Si vous mentez lors d'un jugement, il vaut mieux que vous le fassiez bien. L'expérience montre que vous devriez vous enfuir si vous avez exercé de nombreuses activités criminelles. Dans un tribunal, un *mensonge* est une phrase, prononcée en connaissance de cause, qui est en contradiction avec les observations*. La véracité d'une déclaration est donc vérifiée par l'observation. Ce contrôle lui-même est parfois dénommé la *démonstration* de la déclaration. Pour les tribunaux, comme pour la physique, la *vérité* est donc la correspondance avec les faits, et les *faits* sont les observations partagées par tous. Un « bon » mensonge est donc un mensonge dont le contraste avec les observations partagées est difficile à établir.

La première façon de mentir consiste à mettre l'accent uniquement sur le fait que l'information est plus ou moins partagée. Les populistes et les polémiques le font régulièrement. (« Chaque étranger représente un danger pour les valeurs de notre patrie. »)

* Des déclarations qui ne sont pas encore vérifiées sont indifféremment appelées *spéculations*, *conjectures*, *hypothèses*, ou – de manière inexacte – simplement *thèses*. Des déclarations qui sont en conformité avec les observations sont qualifiées de *correctes* ou *vraies*, celles qui sont en contradiction avec les observations sont dites *erronées* ou *fausses*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Puisque pratiquement n'importe quelle opinion imaginable, même si elle est occulte, est détenue par un certain groupe – et donc partagée –, nous pouvons toujours proclamer qu'elle est vraie*. Malheureusement, il est notoire que des idées deviennent partagées aussi parce qu'elles sont à la mode, imposées ou parce qu'elles s'opposent à quelqu'un qui est généralement méprisé. Souvent un frère ou une sœur dans une famille possède ce rôle – souvenez-vous de Cassandre**. Pour un bon mensonge, nous avons donc besoin de plus de choses que la partageabilité, plus que l'*intersubjectivité* seule.

Un excellent mensonge devrait être, comme une déclaration vraie, réellement indépendant de l'auditeur et de l'observateur et, en particulier, indépendant de leur âge, de leur sexe, de leur éducation, de leur civilisation ou du groupe auquel ils appartiennent. Par exemple, il est particulièrement ardu – mais pas impossible – de mentir avec les mathématiques. La raison en est que les concepts fondamentaux des mathématiques, qu'ils soient « ensemble », « relation » ou « nombre », sont tirés de l'observation et sont intersubjectifs, de telle sorte que les déclarations les concernant sont faciles à vérifier. Généralement, les mensonges évitent les mathématiques***.

Deuxièmement, un « bon » mensonge devrait éviter les déclarations concernant les observations et devrait employer à la place des *interprétations*. Par exemple, certaines personnes aiment discuter à propos d'autres univers, ce qui implique de parler de fantaisies, et non des observations. Un bon mensonge doit éviter, cependant, de tomber dans l'autre extrême, à savoir de faire des déclarations qui sont vides de sens. Le commentaire le plus caustique qui puisse être fait à propos d'une déclaration est celui prononcé par le
Page ?? grand physicien autrichien Wolfgang Pauli : « Ce n'est même pas faux. »

Troisièmement, un bon mensonge ne doit pas se préoccuper des observations, mais seulement de l'imagination. Seule la vérité a besoin d'être *empirique*, pour pouvoir être distinguée des déclarations *spéculatives*. Si vous voulez « bien » mentir même avec des déclarations empiriques, vous devez faire très attention. Il existe deux types de déclarations empiriques : les déclarations *spécifiques* et les déclarations *universelles*. Par exemple, « Le 31 août 1960, j'ai vu un cygne vert nager sur la rive nord du lac de Varèse » est spécifique, alors que « Tous les corbeaux sont noirs » est universelle, puisqu'elle contient le mot « tout ». Il existe une différence notoire entre les deux, qui est importante pour bien mentir : les déclarations spécifiques ne peuvent pas être réfutées, elles sont uniquement vérifiables, alors que les déclarations universelles ne peuvent pas être vérifiées, elles sont
Réf. 181 uniquement réfutables. Pourquoi est-ce ainsi ?

Les déclarations universelles telles que « la vitesse de la lumière est constante » ne peuvent pas être testées pour *tous* les cas possibles. (Remarquez que si elles le pouvaient,

* Le travail du sociologue français Gabriel Tarde (1843–1903), plus particulièrement ses concepts d'*imitation* et de psychologie collective, fait déjà le rapprochement avec cette réalité.

** Les implications du rang de naissance sur la créativité dans les sciences et sur l'acceptation d'idées nouvelles ont été étudiées dans l'ouvrage fascinant de Frank J. Sulloway, *Born to Rebel – Birth Order, Family Dynamics and Creative Lives*, Panthon Books, 1996. Ce livre exceptionnel expose le résultat d'une longue carrière d'étude des corrélations qui existent entre les situations personnelles dans les familles de milliers de personnes et leur perception d'une vingtaine de révolutions environ de l'histoire récente. Ce livre intègre également un test dans lequel le lecteur peut déduire sa propension à se rebeller, sur une échelle allant de 0 à 100 %. Darwin atteint un score de 96 % sur cette échelle.

*** En mathématiques, « vrai » est généralement précisé par « déductible » ou « démontrable » ; c'est en réalité un cas particulier de la définition courante de vérité, à savoir « la conformité avec les faits », si nous rappelons que les mathématiques étudient les propriétés des classifications.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

elles ne seraient plus des déclarations universelles, mais juste une liste de déclarations spécifiques.) Cependant, elles peuvent être anéanties par un contre-exemple. Un autre exemple du type universel est : « Les pommes tombent vers le haut ». Puisqu'elle est démentie par une observation conduite par Newton il y a plusieurs siècles, ou par l'expérience quotidienne, elle est qualifiée de mensonge (aisément décelable). Donc, en général, il est vain de mentir en affirmant le contraire d'une théorie. Si quelqu'un persiste à le faire, ce mensonge devient une *superstition*, une *croyance*, un *préjugé* ou une *doctrine*. Ceux-ci représentent les points de chute dans l'art du mensonge. Une situation célèbre d'insistance sur un mensonge est celle des confrères de Galilée, qui sont réputés pour avoir refusé de regarder dans sa lunette de peur d'être convaincus que Jupiter possède des satellites, une observation qui aurait bouleversé leur croyance que tout tourne autour de la Terre. Évidemment, ces astronomes étaient des novices dans l'art de mentir. Un bon mensonge universel est celui dont le contre-exemple n'est pas identifié de façon aussi facile.

Il ne devrait y avoir aucune raison de mentir en physique. Malheureusement, la physique classique est emplie de mensonges. Nous les écarterons un par un tout au long du reste de notre promenade.

Mentir en formulant des déclarations spécifiques au lieu d'universelles est beaucoup plus facile. (« Je ne peux me rappeler ceci ou cela. ») Même une déclaration explicite telle que « Hier, la Lune était verte, cubique et sentait le fromage » ne peut jamais être complètement réfutée : il n'y a aucune manière de montrer avec une certitude absolue que c'est faux. La seule chose que nous puissions faire est de vérifier si cette affirmation est compatible avec d'autres observations, tel que savoir si cette forme différente affecte les marées comme prévu, si cette odeur peut être retrouvée dans l'air collecté ce jour-là, etc. Un bon mensonge spécifique ne doit donc pas être en contradiction avec d'autres observations*.

À ce propos, les déclarations universelles et spécifiques sont reliées : le *contraire* d'une déclaration universelle est toujours une formulation explicite, et vice versa. Par exemple, le contraire de la formulation générale « les pommes tombent vers le haut », à savoir « certaines pommes tombent vers le bas », est spécifique. De manière identique, l'affirmation spécifique « la Lune est constituée de fromage vert » est en contradiction avec l'assertion universelle « la Lune est solide depuis des millions d'années et ne possède pratiquement pas d'odeur ni d'atmosphère ».

* Il est souvent difficile ou pénible de vérifier des déclarations concernant le passé, et la difficulté augmente avec l'éloignement dans le temps. C'est pourquoi les gens peuvent insister sur l'occurrence d'événements qui sont supposés être des exceptions aux modèles de la nature (« les miracles »). Depuis l'avènement des moyens de communication rapides, ces contrôles sont en passe de devenir de plus en plus faciles, et aucun miracle n'y résiste. Cela peut être vu à Lourdes où, bien qu'aujourd'hui le nombre de visiteurs soit beaucoup plus élevé que par le passé, aucun miracle n'a été signalé depuis des décennies.

En réalité, tous les « miracles » modernes persistent encore uniquement parce que les vérifications sont sciemment abandonnées, comme pour la supposée liquéfaction annuelle du sang à Naples, les statues qui
Réf. 182 boivent apparemment du lait, les guérisseurs présumés dans l'évangélisme télévisé, etc. La majorité des miracles persiste uniquement parce que de nombreuses organisations se font de l'argent sur la difficulté à réfuter des déclarations spécifiques. Par exemple, lorsque la princesse britannique Lady Diana s'éteignit dans un accident de voiture en 1997, bien que ces événements aient été investigués avec beaucoup de minutie, la presse à scandale continua à polémiquer pratiquement sans discontinuer sur les « mystères » de cet accident.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Autrement dit, les tribunaux et les philosophes sont en désaccord. Les tribunaux n'ont aucun problème pour qualifier des théories de vraies et des affirmations spécifiques de mensonges. De nombreux philosophes évitent cette situation. Par exemple, l'affirmation « les vertébrés gazeux irritables n'existent pas » est une déclaration de type universel. Si une déclaration universelle est en accord avec les observations, et si elle est réfutable, les tribunaux disent qu'elle est *vraie*. Le contraire, à savoir l'assertion : « les vertébrés gazeux irritables existent », est du type *spécifique*, puisqu'elle signifie « qu'une personne X a observé un vertébré gazeux irritable en un certain endroit Y à un certain instant Z ». Pour vérifier cela, nous avons besoin d'un enregistrement de cet événement particulier. Si un tel enregistrement, par exemple une photographie ou un témoignage, n'existe pas et si cette déclaration *peut* être réfutée par des observations complémentaires, les tribunaux disent que cette déclaration spécifique est un *mensonge*. Bien que cela constitue les règles de la vie quotidienne et de la loi, il n'y a pas de consensus parmi les philosophes et les scientifiques pour affirmer que c'est acceptable. Pourquoi ? Les intellectuels sont des personnalités prudentes, parce qu'un grand nombre d'entre eux ont perdu la vie après avoir révélé des mensonges trop publiquement.

En résumé, les mensonges spécifiques, comme toutes les déclarations spécifiques, ne peuvent jamais être réfutés avec certitude. C'est ce qui les rend si populaires. Les enfants apprennent les mensonges spécifiques en premier. (« Je n'ai pas mangé la confiture. ») Les mensonges généraux, comme toutes les déclarations générales, peuvent toujours être corroborés par des exemples. C'est la raison de la réussite des idéologies. Mais les critères pour reconnaître les mensonges, même s'ils sont généraux, sont devenus si ordinaires que les croyances et les mensonges tentent de se familiariser avec. Il est devenu habituel d'employer des expressions telles que « fait scientifique » – il n'existe aucun fait non scientifique – ou « scientifiquement prouvé » – les observations ne peuvent pas être prouvées d'une autre manière – et des phrases similaires vides de sens. Celles-ci ne sont pas des « bons » mensonges ; à chaque fois que nous rencontrons des phrases qui commencent par « la science affirme... » ou « la science et la religion font... », le fait de remplacer « science » par « connaissance » ou « expérience » constitue un procédé efficace permettant de vérifier si de telles déclarations doivent être prises au sérieux ou non*.

Les mensonges se différencient des affirmations vraies par leur aspect émotionnel. Les déclarations spécifiques sont généralement inintéressantes et fragiles, tandis que les mensonges spécifiques sont souvent sensationnels et violents. Par opposition, les déclarations générales sont souvent audacieuses et fragiles, alors que les mensonges généraux sont la plupart du temps ennuyeux et violents. La vérité est fragile. Les affirmations vraies exigent que l'auteur sorte vainqueur de la critique. Les chercheurs savent que si nous ne pouvons pas nous en dépêtrer, nous ne pouvons les qualifier d'observations ou de théories. (Une *théorie* est une autre dénomination qui désigne une ou plusieurs déclarations universelles liées, non encore réfutées, concernant des observations**.) Dire la

* Éclaircissons l'usage lexical de ce texte : la *religion*, c'est de la spiritualité plus un degré variable d'abus de pouvoir. Ce mélange dépend du milieu, de l'environnement et des antécédents de chaque individu. La *spiritualité* est l'ouverture attentive à la nature tout entière. La plupart, peut-être la totalité, des personnes qui sont passionnées par la physique font preuve de spiritualité. La majorité d'entre elles ne sont pas religieuses.

** En d'autres termes, un ensemble de modèles, non encore réfutés, d'observations concernant un sujet commun d'étude est appelé une *théorie (physique)*. Le terme « théorie » sera toujours employé dans ce sens dans cette promenade, c'est-à-dire avec la signification « ensemble de déclarations générales correctes ». Cet usage

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vérité nous rend vulnérables. Pour cette raison, les théories sont souvent *audacieuses*, *arrogantes* ou *provocantes*, en même temps qu'elles doivent être *fragiles* et *vulnérables*. Pour les hommes, les théories ressemblent ainsi à ce qu'ils pensent des femmes. *L'origine des espèces* de Darwin, qui développe des théories audacieuses, illustre le contraste frappant qui existe entre les nombreux faits ennuyeux et fermement établis que Darwin avait réunis et la théorie courageuse qu'il en déduisit. La lassitude des faits est un signe de vérité.

Par opposition, les chasseurs de sorcières qui propagent ce que nous appelons le « dessein intelligent » ou le « créationnisme » sont des exemples de menteurs. Les mensonges spécifiques qu'ils véhiculent, comme « le monde fut créé en octobre 4004 AV. J.-C. », sont sensationnels, alors que les mensonges généraux qu'ils diffusent, tels que « il n'y a pas eu de grand bouleversement par le passé », sont inintéressants. Cela est en parfaite contradiction avec la raison commune. De plus, les mensonges, contrairement aux affirmations vraies, attisent la violence. Plus le mensonge est mauvais, plus les gens deviennent violents. Nous pouvons régulièrement observer cette corrélation dans les journaux. Autrement dit, le « dessein intelligent » n'est pas seulement un mensonge, c'est un mauvais mensonge. Un « bon » *mensonge général*, telle une bonne théorie physique, semble insensé et paraît vulnérable, comme par exemple « les gens sont libres d'agir comme bon leur semble ». Un « bon » *mensonge spécifique* est ennuyeux, comme par exemple « ceci ressemble à du pain, mais dans les dix prochaines minutes ce ne sera plus le cas ». Les bons mensonges n'engendrent pas la violence. Les sensations peuvent donc constituer un critère permettant de juger la qualité des mensonges, si nous faisons très attention au type de déclaration. Nous discuterons d'un certain nombre de mensonges communs un peu plus loin dans ce chapitre.

Un aspect primordial de tout mensonge « convenable » consiste à formuler le plus petit nombre possible de déclarations *publiques*, de telle sorte que les critiques puissent avoir le moins de choses possibles à examiner. (Pour toute personne qui enverrait des corrections d'erreurs relevées dans ce texte, l'auteur fournira une petite récompense.) Pour déceler les mensonges, l'examen public minutieux est important, quoique pas toujours fiable. Parfois, même les scientifiques font des déclarations qui ne sont pas fondées sur les observations. Toutefois, un « bon » mensonge est toujours bien apprêté et répété intentionnellement, les mensonges accidentels sont désapprouvés par les experts. Des exemples de bons mensonges en science sont l'« éther », les « OVNI », le « créationnisme scientifique » ou la « fusion froide ». Il faut parfois plusieurs décennies pour faire toute la lumière sur les mensonges dans ces domaines.

Pour résumer, le point central dans l'art de mentir sans en être accusé est élémentaire : ne divulguez pas les détails. Soyez *vague*. Toutes les méthodes utilisées pour vérifier une

est issu de son origine grecque : « theorein » veut dire « observer », sa signification originale, « contemplation passionnée et enthousiaste », synthétise la physique tout entière dans un seul mot. (La « théorie », comme le « théâtre », est formée à partir de la racine θέ, qui signifie « l'action de contempler ».) Parfois, cependant, le mot « théorie » est employé avec la signification de « conjecture » – il est alors confondu avec « hypothèse » – comme dans « votre théorie est fausse », de temps en temps avec la signification de « modèle », comme dans la « théorie de Chern–Simons », et parfois avec le sens de « méthode standard », comme dans la « théorie des perturbations ». Ces usages incorrects seront évités ici. Pour apporter une réponse sur un point précis : la *théorie de l'évolution* n'est pas une conjecture, mais un ensemble de déclarations correctes fondées sur l'observation.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

affirmation demandent des détails, de la *précision*. Pour chaque déclaration, son degré de précision nous permet de mesurer le degré avec lequel son auteur parvient à résister à la critique. Plus nous demandons de précision, plus une déclaration devient vulnérable et plus une faute sera décelée facilement, s'il y en a une. C'est la raison principale pour laquelle nous choisissons un accroissement de la précision comme fil conducteur de notre ascension montagneuse. Par ailleurs, la même méthode est utilisée dans les procès impliquant des criminels. Pour découvrir la vérité, les enquêteurs posent classiquement à tous les témoins un grand nombre de questions, permettant au plus grand nombre possible de *détails* de se faire connaître. Lorsqu'un nombre suffisant de détails est collecté, et que la précision est assez élevée, la situation devient limpide. Il est beaucoup plus difficile de proférer des « bons » mensonges que de dire la vérité, cela requiert une excellente imagination.

> La vérité est au fond du puits.
>
> Démocrite

> Enseigner des superstitions comme vérités est la plus épouvantable des choses.
>
> Hypatie d'Alexandrie (v. 355–415)

> [La vérité absolue :] C'est ce que les scientifiques disent d'elle lorsqu'ils parviennent au bout de leurs efforts.
>
> Charles Peirce

Réf. 184

Cette phrase est-elle vraie ?

> La vérité est un concept rhétorique.
>
> Paul Feyerabend

Les propositions ne peuvent pas toutes être catégorisées comme étant vraies ou fausses. Des déclarations peuvent simplement n'avoir aucun sens. De telles déclarations existent même en mathématiques, où elles sont qualifiées d'*indécidables*. L'hypothèse du continu en est un exemple. Cette hypothèse est indécidable parce qu'elle formule une affirmation qui dépend de ce que l'on entend précisément par le terme « ensemble » ; dans l'usage mathématique courant ce terme n'est pas défini de manière suffisamment précise, de telle sorte qu'une valeur de vérité peut être assignée à l'hypothèse du continu. En bref, des propositions peuvent être indécidables parce que les concepts qu'elles contiennent ne sont pas définis de manière concise.

Des affirmations peuvent également être indécidables pour d'autres raisons. Des phrases telles que « cette phrase n'est pas vraie » illustrent la situation. Kurt Gödel* a même imaginé une manière générale de construire de telles affirmations dans le domaine de la logique et des mathématiques. Les variantes de ces propositions *auto-référentes*, particulièrement populaires à la fois dans les disciplines de la logique et de l'informatique, ont fasciné un large public**. De manière identique, les propositions indécidables

* Kurt Gödel (1906–1978) était un célèbre logicien autrichien.

** Une introduction générale en est donnée dans les magnifiques ouvrages de Raymond Smullyan : *Satan, Cantor and Infinity and Other Mind-boggling Puzzles*, Knopf, 1992 ; *What is the Name of This Book ?*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

peuvent être construites avec des termes tels que « calculable », « démontrable » et « déRéf. 185 ductible ».

En réalité, les propositions auto-référentes sont indécidables parce qu'elles sont dénuées de sens. Si la définition usuelle de « vrai », à savoir l'adéquation avec les faits, est substituée en la phrase « cette phrase n'est pas vraie », nous voyons immédiatement qu'elle ne possède aucun contenu significatif. De toutes les phrases dépourvues de sens, celle qui reste la plus célèbre fut construite par le linguiste Noam Chomsky :

Des idées vertes sans couleur dorment furieusement.

Elle est souvent employée comme modèle des propriétés de traitement du langage dans Réf. 151 le cerveau, mais personne de raisonnable ne l'a élevée au rang de paradoxe et n'a rédigé de discussion philosophique à son propos. En faire de même avec le titre de cette section constitue un gaspillage analogue d'énergie.

La raison principale du succès populaire de l'auto-référence est la difficulté à percevoir l'absence de signification*. Un exemple excellent est la proposition :

Cette proposition est fausse ou vous êtes un ange.

Nous pouvons réellement déduire de celle-ci que « vous êtes un ange ». Pouvez-vous voir Défi 236 s pourquoi ? Si vous le voulez, vous pouvez changer la deuxième partie et obtenir des propositions encore plus intéressantes. De tels exemples montrent que les affirmations qui se réfèrent à elles-mêmes doivent être considérées avec beaucoup de soin lorsqu'elles sont examinées. En bref, à chaque fois que vous rencontrez quelqu'un qui tente d'utiliser la construction auto-référente de Kurt Gödel pour en déduire une autre proposition, prenez du recul et faites un pas en arrière ou, encore mieux, plusieurs. L'auto-référence, particulièrement du type défini par Gödel, constitue une voie ardue mais courante – surtout parmi ceux qui se targuent d'être intellectuels – pour réfléchir, parler et écrire sur le *non-sens*. Rien d'utile ne peut être déduit à partir du non-sens. D'accord, pas tout à fait : cela permet vraiment de rencontrer des psychiatres de manière régulière.

En physique, dans les autres sciences naturelles et dans les procès en justice, ces problèmes ne surgissent pas, parce que les phrases auto-référentes ne sont pas utilisées**. En réalité, le travail des logiciens confirme, souvent d'une manière quelque peu impressionnante, qu'il n'existe aucune façon d'étendre le terme « vérité » au-delà de sa définition de « correspondance avec les faits ».

The Riddle of Dracula and Other Logical Puzzles, Touchstone, 1986, (en français sous le titre *Quel est le titre de ce livre ?*, Dunod, 1981 [N.D.T.]) et *The Lady or the Tiger ? And Other Puzzles*, Times Books, 1982 (en français sous le titre *Le Livre qui rend fou*, Dunod, 1984 [N.D.T.]). Les définitions également peuvent n'avoir aucun contenu, comme « le plus petit nombre qui n'a pas été mentionné ce siècle » ou « la plus petite succession de nombres qui est décrite par plus de signes que cette proposition » de David Hilbert.

* Une victime bien connue de cette difficulté est Paul de Tarse. Le paradoxe du poète crétois *Épiménide* (VIIe siècle AV. J.-C.), qui affirma que « Tous les Crétois sont des menteurs », était trop difficile pour Paul, notoirement dénué d'humour. Dans sa lettre à Titus (chapitre I, strophes 12 et 13, dans la Bible chrétienne), il qualifiait Épiménide de « prophète », ajoutait quelques commentaires racistes, et déclarait que cette « dépoRéf. 186 sition » est vraie. Mais attendez, cette histoire ne s'arrête pas là. L'affirmation que « Tous les Crétois sont des menteurs » n'est *pas du tout* un paradoxe, une valeur de vérité peut vraiment lui être attribuée, parce que Défi 235 s cette proposition n'est pas réellement auto-référente. Pouvez-vous le confirmer ? Le seul paradoxe *authentique* est « Je suis un menteur », auquel il est en réalité impossible d'affecter une valeur de vérité.

** Pourquoi les propositions circulaires, telles que celles de la physique galiléenne, ne sont-elles pas autoDéfi 237 pe référentes ?

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

> « Ein Satz kann unmöglich von sich selbst aussagen, daß er wahr ist*. »
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.442

Curiosités et défis amusants sur les mensonges

> « Es ist ja nicht alles, was ich den Bürgern sage, gelogen**. »
> Konrad Adenauer, 1962, chancelier allemand.

Certains mensonges sont divertissants, d'autres sont prononcés dans un but criminel, certains sont excellents, d'autres sont mauvais.

* *

Défi 238 e « Hier, je me suis noyé. » Est-ce un bon ou un mauvais mensonge ?

* *

À partir des années 1990, ce que nous appelons des *agroglyphes**** furent façonnés par des individus marchant dans les champs de céréales avec des échasses, un instrument en bois et quelques cordes. Néanmoins, beaucoup de gens prétendirent et d'autres crurent que ces cercles étaient dus à des êtres extraterrestres. Est-ce un bon ou un mauvais mensonge ? Pouvez-vous découvrir une raison pour laquelle cela est impossible ?

Défi 239 pe

* *

Dans certains pays, deux mensonges étaient particulièrement répandus au début du vingt et unième siècle. Le premier : le réchauffement de la planète n'existe pas. Le second : le réchauffement de la planète n'est pas engendré par l'activité humaine. Sont-ils de bons ou de mauvais mensonges ?

Défi 240 s

* *

Nous entendons parfois dire qu'une personne dont la peau est entièrement recouverte de la poudre métallique la plus fine succombera à cause de l'impossibilité pour l'épiderme de respirer. Pouvez-vous montrer que c'est faux ?

Défi 241 pe

* *

Un célèbre amalgame de canular et de croyance infondée présuppose que la Terre fut créée il y a environ six mille ans. (Certains partisans utilisent même cette affirmation erronée pour justifier leur véhémence contre ceux qui n'y croient pas.) Pouvez-vous expliquer pourquoi cette datation est fausse ?

Défi 242 pe

* *

Une provocation notoire : le monde a été créé samedi dernier. Pouvez-vous déterminer

* Il est quasiment impossible pour une proposition de déclarer qu'elle est elle-même vraie.

** « En vérité, tout ce que je dis aux gens n'est pas un mensonge. »

*** Parfois également appelés « cercles de culture » ou « cercles de récolte ». Un agroglyphe est la zone d'un champ de blé, ou d'autres céréales similaires, dont certains épis ont été recourbés ou couchés pour former diverses formes géométriques, certaines en trois dimensions et d'autres en deux. [N.D.T.]

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 243 pe si c'est faux ?

* *

Des centaines de canulars sont consultables sur le site Web www.museumofhoaxes.com. Celui-ci donne une excellente introduction à l'art de mentir. Bien évidemment, il expose uniquement ceux qui ont été découverts. Amusez-vous avec les récits scientifiques, particulièrement ceux qui concernent l'archéologie. (Nombre d'autres sites ayant des contenus similaires peuvent être trouvés sur Internet.)

* *

Dans les années 1990, aux Philippines, un grand nombre de « guérisseurs » firent fortune en persuadant des patients qu'ils étaient capables d'extraire des objets de leur corps, sans
Défi 244 e opération. Pourquoi ceci n'est-il pas possible ? (Pour plus d'information sur les mensonges médicaux, consultez le site www.quackwatch.com.)

* *

Depuis les années 1980, des gens ont proclamé qu'il est possible d'acquérir des informations simplement à l'aide de quelqu'un situé à une distance de 1 000 km, sans aucune communication que ce soit entre les deux personnes. Cependant, ces hypothétiques
Défi 245 e « champs morphogénétiques » ne peuvent pas exister. Pourquoi ?

* *

On dit qu'un bâtiment de sapeurs-pompiers situé dans une ville des États-Unis abrite une ampoule électrique qui est restée allumée sans interruption depuis 1901 (cela était au
Défi 246 s moins le cas en 2005). Cela peut-il être vrai ? Des centaines de récits analogues, souvent dénommés « rumeurs », peuvent être consultés sur le site www.snopes.com. Toutefois, certaines de ces histoires ne sont pas des canulars, elles sont vraies, comme le mentionne ce site Web.

* *

« Cette phrase a été traduite de l'anglais au français. » Cette proposition est-elle vraie, fausse ou ni l'une ni l'autre ?

* *

Des avions n'ont aucun siège dans la rangée 13. De nombreux hôtels très élevés n'ont pas de treizième étage. Quel est le mensonge dissimulé derrière cette coutume ? Quelle est la
Défi 247 s vérité cachée derrière celle-ci ?

* *

Depuis environ un millier d'années, certaines personnes prétendent qu'elles ont été stigmatisées, c'est-à-dire qu'elles ont « miraculeusement » enduré des blessures qui sont similaires à celles de la crucifixion de Jésus. Comment pouvons-nous démontrer par une
Défi 248 s observation immédiate que tous ces gens ont produit ces blessures eux-mêmes ?

* *

« Au Moyen Âge et dans l'Antiquité, les gens pensaient que la Terre était plate. » C'est un

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

fameux mensonge qui est rarement contesté. L'historien Reinhard Krüger a montré que cette contrevérité est principalement due aux écrivains Thomas Paine (1794) et Washington Irving (1928). La vérité est que, depuis Aristote, tout le monde croyait en une Terre sphérique.

* *

Le mot « multivers » (un prétendu contraire de l'« univers ») représente-t-il un mensonge
Défi 249 s ou une croyance ?

* *

Ce qui suit n'est pas un mensonge. Une bonne manière de supprimer la curiosité chez les enfants est employée dans de nombreux milieux : laissez l'enfant regarder la télévision à chaque fois qu'il le désire. Faites-le pendant quelques semaines, et vous ne reconnaîtrez plus cet enfant. Faites-le pendant quelques années, et la curiosité disparaîtra à jamais.

* *

Défi 250 pe Comment montreriez-vous que les rayons terrestres de la radiesthésie sont un artifice ?

* *

Comment démontreriez-vous que la phrase « les lois de la nature peuvent changer tout
Défi 251 s le temps » est un mensonge ?

OBSERVATIONS

> « La connaissance est une expression compliquée pour désigner l'ignorance. »
>
> Attribué à Karl Popper

Le recueil d'un grand nombre de propositions vraies concernant un type d'observation, c'est-à-dire d'un grand nombre de faits, est appelé la *connaissance*. Lorsque le
Réf. 187 domaine des observations est suffisamment étendu, nous parlons alors de *science*. Un *scientifique* est donc quelqu'un qui collecte la connaissance*. Nous avons découvert plus haut qu'une observation est de l'information classée dans la mémoire de plusieurs personnes. Puisqu'il y a du mouvement partout, décrire toutes ces observations constitue une tâche titanesque. Comme pour toute tâche considérable, l'utilisation des outils appropriés détermine largement le niveau de réussite qui peut être atteint. Ces instruments, en physique et dans toutes les autres sciences, se classent en trois catégories : les outils

* Le mot anglais « scientist » (en français « scientifique ») est un terme mal approprié spécifique à la langue anglaise. Pour l'exprimer de manière correcte, un « scientiste » est un partisan du *scientisme*, une école philosophique extrémiste qui s'évertue à résoudre tous les problèmes à travers la science. Pour cette raison, certaines sectes religieuses possèdent ce terme dans leur nom. Puisque la langue anglaise ne possède pas de terme plus court pour désigner les « scientifiques » autrement que par « scientific persons », comme ils devraient être appelés, le mot « scientist » commença à apparaître aux États-Unis à partir du dix-huitième siècle. De nos jours, ce mot est employé dans tous les pays anglophones – mais pas en dehors de ceux-ci, par chance.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

permettant de collecter des observations, les outils permettant de communiquer des observations, et les outils permettant de communiquer les relations qu'il y a entre les observations. Ce dernier groupe a déjà été discuté dans la section sur le langage et sur les mathématiques. Nous allons juste dire deux mots concernant les deux autres.

Une quantité d'observations suffisante a-t-elle été relevée ?

> « Chaque génération a tendance à définir « l'achèvement de la physique » comme coïncidant avec la fin de ses contributions scientifiques. »
>
> Julian Schwinger*

La physique est une science expérimentale, elle s'appuie sur le rassemblement des observations. Pour réaliser efficacement cette fonction, toutes sortes d'*instruments*, c'est-à-dire d'outils qui facilitent les observations, ont été développés puis construits. Les microscopes, les télescopes, les oscilloscopes, ainsi que les thermomètres, les hygromètres, les manomètres, les pyromètres, les spectromètres et beaucoup d'autres encore en constituent des exemples familiers. La précision de la plupart de ces outils est constamment en cours d'amélioration aujourd'hui encore. Leur fabrication représente une portion significative de l'activité industrielle moderne, les exemples étant les appareils de mesure électrique et les instruments de diagnostic pour la médecine, la chimie et la biologie. Ces instruments peuvent être aussi petits qu'une pointe de quelques atomes de tungstène pour produire un faisceau d'électrons de quelques volts, et aussi vastes qu'une installation de 27 km de circonférence, produisant un faisceau d'électrons et doté de plus de 100 GV de tension utile pour produire une accélération. Des instruments ont été conçus pour contenir et mesurer la matière la plus froide que nous connaissons dans l'Univers. D'autres instruments peuvent mesurer des variations de longueur beaucoup plus petites que le diamètre d'un proton sur des distances de quelques kilomètres. Des instruments ont été placés dans les profondeurs de la Terre, sur la Lune et sur plusieurs planètes, ou ont été propulsés en dehors du Système solaire.

Dans cette excursion, les instruments ne sont pas examinés, de nombreux ouvrages de qualité sont disponibles sur ce sujet. La plupart des observations amassées par les instruments ne sont pas mentionnées ici. Les résultats les plus importants en physique sont signalés dans les publications courantes, telles que l'encyclopédie Landolt–Börnstein et les revues de physique (l'Annexe C donne un aperçu général concernant les sources d'information).

Réf. 189, Réf. 190

Réf. 191

Y aura-t-il de nouvelles observations ultérieures de grande importance dans le domaine des fondamentaux du mouvement ? En ce moment, *en particulier dans ce domaine*, bien que le nombre de physiciens et de publications ait atteint un niveau sans précédent, le nombre de nouvelles découvertes expérimentales est resté en constante diminution

* Julian Seymour Schwinger (1918–1994) fut un enfant américain prodige. Reconnu pour sa clarté d'esprit et ses excellentes conférences, il travailla sur les guides d'onde et sur le rayonnement synchrotron, apporta des contributions à la physique nucléaire et développa l'électrodynamique quantique. Pour cette dernière, il reçut le prix Nobel de physique en 1965 avec Tomonaga et Feynman. Il fut le directeur de thèse de nombreux physiciens célèbres et écrivit plusieurs excellents ouvrages de référence. Néanmoins, à la fin de sa vie, il s'intéressa étrangement à une amère fumisterie : la fusion froide.

Réf. 188

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pendant de nombreuses années, et est dorénavant plutôt réduit. La sophistication et l'investissement nécessaires pour obtenir de nouveaux résultats sont devenus extrêmement élevés. Dans un grand nombre de situations, les instruments de mesure sont parvenus aux limites technologiques, budgétaires ou même à celles de la nature. Le nombre de nouvelles expériences révélant des résultats qui ne montrent aucun écart par rapport aux prédictions théoriques est en augmentation croissante. Le nombre d'articles remarquables qui ont tenté d'éveiller des domaines d'investigation réputés austères ou en déclin s'est accru. Les revendications de l'existence d'effets nouveaux qui se sont révélées finalement fausses, à cause d'erreurs de mesure, d'effets non pris en compte, de biais expérimentaux ou même de fraudes, sont devenues si fréquentes que le scepticisme est désormais l'attitude courante. Bien que dans de nombreux domaines de la science, y compris la physique, des découvertes soient toujours attendues, sur les fondamentaux du mouvement l'argumentation que nous venons de présenter semble montrer que de nouvelles observations ne demeurent qu'une éventualité lointaine. La tâche consistant à collecter des observations sur les fondements du mouvement (bien que les autres branches de la physique ne soient pas concernées) semble être *complète*. En réalité, la plupart des observations décrites ici furent relevées avant la fin du vingtième siècle. Nous ne sommes pas trop en retard dans notre promenade.

> « Mesure ce qui est mesurable, rends mesurable ce qui ne l'est pas. »
>
> Faussement attribué à Galilée.

Réf. 192

Toutes les observables physiques sont-elles connues ?

> « Les scientifiques se comportent de manière antipathique, sauf lorsque vous soutenez leur théorie : vous pouvez alors leur emprunter de l'argent. »
>
> Mark Twain

La manière la plus commode de communiquer des observations a été développée il y a très longtemps : grâce aux mesures. Une mesure permet une communication efficace relative à une observation vers d'autres époques et d'autres lieux. Cela n'est pas toujours aussi évident qu'il paraît : par exemple, au Moyen Âge les gens étaient incapables de comparer avec précision la « froidure » des hivers de deux années différentes ! L'invention du thermomètre apporta une solution fiable à ce besoin. Une *mesure* est donc la classification d'une observation dans un ensemble standard d'observations ou, pour faire simple, une *comparaison avec un étalon de référence*. Cette définition d'une mesure étant précise et pratique, elle a été par conséquent universellement adoptée. Par exemple, lorsque la longueur d'une maison est mesurée, cette caractéristique de l'habitation est classifiée dans un certain ensemble de longueurs de référence, à savoir l'ensemble des longueurs définies par les multiples d'une unité. Une *unité* est le nom abstrait qui désigne l'étalon de référence pour une observable donnée. Les nombres et les unités permettent la communication la plus précise et la plus efficace concernant les résultats des mesures.

Des unités de référence pratiques et des méthodes de mesure ont été définies pour toutes les quantités mesurables, les principales sont listées et définies dans l'Annexe B. Toutes les unités sont dérivées d'un petit nombre d'unités fondamentales, ce qui est en

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

fin de compte dû à notre nombre limité de facultés sensorielles : longueur, durée et masse sont reliées à la vue, à l'ouïe et au toucher. La limitation de nos sens est, par la suite, due au petit nombre d'observables de la nature.

Nous appelons *observables* les différents aspects mesurables d'un système. La majorité des observables, telles que la taille, la vitesse, la position, etc. peuvent être décrites par des nombres, et dans ce cas ce sont des *quantités*, c'est-à-dire des multiples d'une certaine unité de référence. Les observables sont généralement notées par des *symboles (mathématiques)*, d'habitude des lettres d'un alphabet donné. Par exemple, le symbole *c* désigne couramment la vitesse de la lumière. Pour la plupart des observables, des symboles standards ont été définis par des organismes internationaux*. Les symboles pour les observables qui décrivent l'état d'un objet sont également appelés *variables*. Les variables dont dépendent d'autres observables sont souvent appelées *paramètres*. (Souvenez-vous : un paramètre est une constante variable.) Par exemple, la vitesse de la lumière est une constante, la position une variable, la température est souvent un paramètre, dont la longueur d'un objet, par exemple, peut dépendre. Remarquez que toutes les observables ne sont pas forcément des quantités : en particulier, les parités ne sont pas des multiples d'une quelconque unité.

Aujourd'hui le travail de définition des outils nécessaires à la communication des observations peut être considéré comme *complet*. (Pour les quantités, c'est certainement exact, pour les observables de type pair–impair, il pourrait y avoir encore quelques exemples à découvrir.) C'est une déclaration élémentaire mais profonde. Même le BIPM, le Bureau international des poids et mesures, a cessé d'ajouter de nouvelles unités**.

En guise de remarque, l'éminence d'un physicien peut être quantifiée par le nombre d'observables qu'il a introduit. Même un grand scientifique comme Einstein, qui a découvert un grand nombre de « lois » de la nature, n'introduisit qu'une seule nouvelle observable, à savoir le tenseur métrique pour la description de la gravité. En suivant ce critère – de même que plusieurs autres – Maxwell est le physicien le plus important, car il a introduit les champs électrique et magnétique, le potentiel vecteur et plusieurs autres observables dépendantes de la matière. Pour Heisenberg, Dirac et Schrödinger, la fonction d'onde qui décrit le mouvement de l'électron pourrait être comptabilisée comme une moitié d'observable (car c'est une quantité nécessaire pour calculer des résultats expérimentaux, mais elle ne constitue pas en elle-même une observable). À ce propos, même l'introduction d'un terme *quelconque*, qui est réutilisé par d'autres personnes, constitue un événement rare : « gaz », « entropie » et quelques autres seulement en sont des exemples. Il a toujours été beaucoup plus difficile de découvrir une observable que de découvrir une « loi », généralement les observables sont développées par un ensemble d'individus qui coopèrent. En fait, de nombreuses « lois » portent des noms de personnes, mais pratiquement aucune observable.

* Tous les symboles mathématiques utilisés dans cette excursion, y compris les alphabets auxquels ils sont associés, sont listés dans l'Annexe A sur les notations. Ils obéissent aux standards internationaux à chaque fois qu'ils sont définis. Les symboles de référence concernant les quantités physiques, définis par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) et l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) peuvent être consultés par exemple dans la *bible*, c'est-à-dire le *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, 1992.

** La dernière unité, le katal ou mol/s, fut introduite en 1999. Les unités physiques sont présentées dans l'Annexe B.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Si la liste des observables nécessaires pour décrire la nature est exhaustive, cela signifie-t-il que tous les modèles ou règles de la nature sont connus ? Non, dans l'histoire de la physique, les observables ont généralement été définies et mesurées longtemps *avant* que les règles précises qui les mettent en avant soient découvertes. Par exemple, toutes les observables utilisées dans la description du mouvement lui-même, tels le temps, la position et ses dérivées, la quantité de mouvement, l'énergie et toutes les quantités thermodynamiques, furent définies avant ou au cours du dix-neuvième siècle, alors que les versions les plus précises des modèles ou des « lois » de la nature qui les associent, la relativité restreinte et la thermodynamique du non-équilibre, ont été découvertes au vingtième siècle seulement. La même chose est vraie pour toutes les observables associées à l'interaction électromagnétique. Le modèle correspondant de la nature, l'électrodynamique quantique, fut découvert longtemps après les observables qui s'y rapportent. Celles qui furent découvertes en dernier furent les champs des interactions nucléaires faible et forte. Dans ce cas aussi les modèles de la nature ont été formulés beaucoup plus tard*.

Les observations prennent-elles du temps ?

Une observation est une interaction avec une certaine partie de la nature, conduisant à la production d'un enregistrement, tels un souvenir dans le cerveau, des données sur une bande, de l'encre sur une feuille, ou tout autre élément figé appliqué sur un support. Le processus d'interaction irréversible nécessaire est souvent baptisé l'*écriture* de l'enregistrement. Manifestement, le fait d'écrire prend un certain temps, un temps d'interaction nul ne permettrait aucun enregistrement. Par conséquent tout dispositif d'enregistrement, y compris notre cerveau, mémorise toujours dans une certaine mesure la *moyenne dans le temps* de l'observation, même si elle est très courte.

Ce que nous appelons une image figée, qu'elle soit une image mentale ou une photographie, représente toujours la moyenne temporelle d'une situation en mouvement. Si nous ne pouvions faire de moyenne dans le temps, nous n'aurions pas de souvenirs figés. D'un autre côté, toute moyenne temporelle introduit un certain flou qui masque des détails, et dans notre quête de précision, à partir d'un certain moment, ces détails sont nécessairement importants. La découverte de ces détails commencera dans la prochaine partie de cette promenade, celle centrée sur la théorie quantique. Dans la dernière partie de notre ascension montagneuse, nous découvrirons qu'il existe une durée moyenne, qui est la plus courte possible. Les observations de cette brève durée exhibent tant de détails que même la distinction entre les particules et l'espace vide devient confuse. Contrairement à cela, nos concepts liés à la vie de tous les jours ne surgissent qu'après des durées moyennes relativement longues. La recherche d'une description de la nature qui s'affranchit de cette moyenne constitue l'un des grands défis de notre aventure.

* Après tout, est-il possible de discuter des observations ? C'est le passe-temps favori de nombreux philosophes que de discuter pour savoir s'il existe vraiment un exemple d'« Elementarsatz » (de « proposition élémentaire » [N.D.T.]) mentionné par Wittgenstein dans ses *Tractatus*. Il semble qu'il y en ait au moins une qui convient : *les différences existent*. C'est une phrase simple, elle jouera un rôle crucial dans l'ultime partie de notre promenade.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'INDUCTION EST-ELLE UN PROBLÈME EN PHYSIQUE ?

> Nur *gesetzmäßige* Zusammenhänge sind *denkbar**.
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.361

> Il existe traditionnellement une opposition entre les partisans de l'induction et ceux de la déduction. Selon mon point de vue il serait aussi sensé que les deux extrémités d'un ver se querellent.
>
> Alfred North Whitehead

L'induction est le terme courant employé pour désigner l'acte de faire des conclusions générales, à partir d'un nombre réduit et fini d'expériences, concernant l'issue de *toutes* les expériences possibles réalisées dans d'autres lieux ou à d'autres époques. En un sens, c'est le terme technique permettant de généraliser, qui est nécessaire dans toute déclaration scientifique. L'induction est demeurée un sujet majeur de discussions pour les commentateurs scientifiques. Nous rencontrons fréquemment la remarque qui stipule que la connaissance en général, et plus particulièrement en physique, se fonde sur l'induction pour formuler ses propositions. D'après certains, l'induction est une sorte de croyance cachée qui est à l'origine de toutes les sciences mais, en même temps, qui est en contradiction avec celles-ci.

Pour éviter un gaspillage d'efforts inutiles, nous ne ferons que quelques remarques. La première peut être déduite d'une expérience élémentaire. Tentez de convaincre un détracteur de l'induction de mettre sa main dans le feu. De tous ceux qui qualifient franchement l'induction de croyance, personne ne conclurait à partir de quelques expériences malheureuses qui ont eu lieu par le passé qu'un tel acte serait également préjudiciable dans le futur... En bref, d'une certaine manière, l'induction marche.

Un deuxième point est que les propositions universelles de la physique sont toujours formulées ouvertement : elles ne sont jamais dissimulées. Le refus de mettre sa main dans le feu est une conséquence de l'invariance des observations sous les translations de temps et d'espace. En réalité, les déclarations générales de ce type forment les premiers fondements de la physique. Cependant, aucune proposition physique n'est une croyance uniquement parce qu'elle est universelle : elle reste continuellement ouverte aux vérifications expérimentales. L'induction physique n'est pas une méthode obscure d'argumentation, c'est une partie explicite des formulations expérimentales. En fait, la liste complète des propositions « inductives » utilisées en physique est donnée dans le tableau de la page 201. Ces affirmations sont si importantes qu'elles se sont vu attribuer un nom particulier : elles sont appelées des *symétries*. Ce tableau liste toutes les symétries connues de la nature ; autrement dit, elle dresse la liste de toutes les déclarations inductives utilisées en physique.

Le meilleur argument pour l'utilisation de l'induction est probablement qu'il n'existe aucune manière de l'éviter lorsque nous sommes en train de réfléchir. Il n'existe aucun moyen de penser, de parler ou de se souvenir de quelque chose qui ne fasse appel à des concepts, c'est-à-dire qui n'admette que la plupart des objets ou des entités conservent les mêmes propriétés au cours du temps. Il n'y a également aucun moyen

* Seules les correspondances qui sont *sujettes à la loi* sont *concevables*.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de communiquer avec d'autres sans supposer que les observations faites à partir des points de vue des autres sont similaires au nôtre. Il n'y a pas de façon de penser sans la symétrie et l'induction. En réalité, ces concepts associés à la symétrie et à l'induction, tels que l'espace et le temps, appartiennent aux concepts fondamentaux du langage. Les seules phrases qui ne font pas appel à l'induction, les propositions de la logique, ne possèdent aucun contenu (*Tractatus*, 6.11). En vérité, sans l'induction, nous ne pouvons plus classifier les observations ! L'évolution nous a dotés d'une mémoire et d'un cerveau parce que l'induction fonctionne. Faire la critique de l'induction ne consiste pas à critiquer les sciences de la nature, cela consiste à critiquer l'usage de la pensée en général. Nous ne devrions jamais prendre trop au sérieux les gens qui font eux-mêmes ce qu'ils reprochent aux autres, s'ils soulèvent fortuitement le ridicule de cette tentative alors ils méritent simplement qu'on leur accorde de l'attention.

Page 176
Réf. 187
Défi 252 s

Ce sujet pourrait se conclure ici, mais c'est sans compter sur certains développements intéressants en physique moderne qui enfoncent deux clous décisifs dans le cercueil des arguments contre l'induction. Premièrement, en physique, à chaque fois que nous faisons des propositions au sujet de toutes les expériences, tous les instants ou toutes les vitesses, ces propositions ne concernent en réalité qu'un *nombre fini* de situations. Nous savons aujourd'hui que les infinis, à la fois en taille et en nombre, ne se produisent jamais dans la nature. Le nombre infini de cas qui apparaissent dans les formulations de la physique classique et dans la mécanique quantique est apparent, donc non réel, et dû à des simplifications et des approximations humaines. Des expressions qui stipulent qu'une certaine expérience donne le même résultat « partout » ou qu'une équation donnée est correcte pour « tous les instants » n'englobent toujours qu'un nombre *fini* d'exemples. On évite de cette manière beaucoup de frustration souvent instinctive face à de telles déclarations. Dans les sciences, ainsi que dans ce livre, « tout » ne signifie *jamais* un nombre infini de situations.

Finalement, nous savons bien que l'extrapolation d'un petit nombre de cas à un grand nombre est erronée lorsque les quelques situations considérées sont indépendantes les unes des autres. Cependant, cette conclusion est correcte si les cas sont interdépendants. À partir du fait que quelqu'un a trouvé une pièce dans la rue deux mois de suite, on ne peut pas déduire qu'il en trouvera une le mois prochain. L'induction est correcte uniquement si nous savons que toutes les situations ont un comportement similaire, par exemple parce qu'elles sont issues de la même cause. Disons, si un voisin ayant un trou dans sa poche transporte son salaire le long de cette rue une fois par mois, et si le trou s'ouvre toujours à cet endroit parce qu'il y a des escaliers à gravir, alors cette conclusion pourrait être exacte. Il apparaît que les résultats de la physique moderne, que nous rencontrerons dans la dernière partie de notre excursion, montreront que toutes les situations dans la nature sont en réalité interdépendantes, et nous démontrons ainsi précisément que ce que nous appelons « induction » est en fait une conclusion logiquement correcte.

> « Dans l'essor de la physique, l'exception se révèle généralement être le cas général. »

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

LA QUÊTE DE PRÉCISION ET SES CONSÉQUENCES

> Der Zweck der Philosophie ist die logische Klärung der Gedanken*.
>
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.112

Pour bien discuter du mouvement, il faut parler avec précision. La précision impose d'éviter trois erreurs courantes dans la description de la nature.

Premièrement, les concepts ne devraient jamais avoir une contradiction inhérente à leur définition. Par exemple, tout phénomène se produisant dans la nature est évidemment un phénomène « naturel » ; par conséquent, discuter à propos des phénomènes « surnaturels » ou des phénomènes « artificiels » constitue une erreur que toute personne intéressée par le mouvement ne devrait jamais commettre. De tels termes renferment une contradiction logique. Naturellement, *toutes* les observations sont naturelles. Par ailleurs, il y a une récompense de plus d'un million de dollars pour celui qui démontrera le contraire. En plus de vingt ans, personne n'a encore été capable de la recevoir.

Réf. 193

Deuxièmement, les concepts ne devraient pas avoir de définition vague ou qui varie constamment. Leur contenu et leurs limites doivent être précisés de manière constante et explicite. Nous rencontrons fréquemment le contraire de cela chez les charlatans ou les politiciens populistes. Cette exigence permet de les distinguer des savants plus dignes de confiance. Les physiciens peuvent également tomber dans le piège : par exemple, il n'existe, bien évidemment, qu'*un seul* univers (physique), comme l'indique même cette désignation. Il est complètement stérile de discourir sur l'existence de plusieurs univers, malheureusement cela est de plus en plus fréquent.

Réf. 194

Troisièmement, les concepts ne devraient pas être utilisés en dehors de leur domaine d'application. Il est facile de succomber à la tentation de transférer des résultats de la physique à la philosophie sans en vérifier le contenu. La question suivante en est un exemple : « Pourquoi les particules obéissent-elles aux lois de la nature ? » Le vice dans la question est dû à une mauvaise compréhension de l'expression « lois de la nature » et à une confusion avec les lois de la nation. Si la nature était gouvernée par des « lois », celles-ci pourraient être modifiées par le Parlement. En nous souvenant que les « lois de la nature » signifient simplement « modèles », « propriétés » ou « descriptions de comportement », et en reformulant correctement cette question ainsi : « Pourquoi les particules se comportent-elles précisément de la manière dont nous décrivons leur comportement ? », nous pouvons reconnaître son manque de logique.

Tout au long de notre promenade, nous serons souvent attirés par les sirènes de ces trois égarements. Voici quelques situations de ce type, avec les méthodes pour les éviter.

> La logique est le dernier refuge des gens qui manquent d'imagination.
>
> Oscar Wilde

* Le but de la philosophie est la clarification logique de la pensée.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Que sont les interactions ? – Aucune émergence

> Le tout est toujours bien plus que la somme de ses parties.
>
> Aristote, *Métaphysique*, 10f–1045a.

Dans la description physique de la nature, le tout est toujours *plus* que la somme de ses parties. En réalité, la différence entre le tout et la somme de ses parties est si importante qu'elle possède une dénomination particulière : c'est l'*interaction* entre les parties. Par exemple, l'énergie du tout moins la somme des énergies de ses parties est appelée l'énergie d'interaction. En fait, l'étude des interactions constitue le domaine de prédilection de la physique. Autrement dit, la physique s'intéresse *essentiellement* à la différence qu'il y a entre les parties et le tout, contrairement à ce que les mauvais journalistes ou d'autres penseurs stupides prétendent fréquemment.

Notez que le terme « interaction » est fondé sur l'observation générale que tout ce qui affecte n'importe quoi d'autre est, en retour, affecté par celui-ci : les interactions sont *réciproques*. Par exemple, si un corps modifie la quantité de mouvement d'un autre, alors le second modifie la quantité de mouvement du premier de la même quantité (négative). La réciprocité des interactions est une conséquence des « lois » de conservation. Cette réciprocité est également la raison pour laquelle toute personne qui emploie le mot « interaction » est considérée comme étant hérétique par les religions monothéistes, comme les théologiens le soulignent régulièrement. Ils insistent constamment sur le fait qu'une
Défi 253 pe telle réciprocité renie implicitement l'inaltérabilité de la divinité. (Ont-ils raison ?)

L'application de la définition de l'interaction soulève également la question, que l'on entend souvent, de savoir si dans la nature il y a des propriétés « émergentes », c'est-à-dire des propriétés de systèmes qui ne peuvent pas être déduites à partir des propriétés de leurs parties et de leurs interactions. Par définition, il n'existe aucune propriété « émergente ». Celles-ci ne peuvent apparaître que si les interactions sont évaluées de manière
Page 281 approximative ou tout simplement ignorées. L'idée de propriétés « émergentes » est un pur produit des esprits dotés de visions réduites, incapables de percevoir ou d'admettre
Réf. 195 la profusion de conséquences que les principes généraux peuvent engendrer. En défendant l'idée de l'émergence, nous déprécions l'importance des interactions, en œuvrant d'une manière apparemment inoffensive, peut-être inconsciente, mais en réalité sournoise, contre l'utilisation de la raison dans l'étude de la nature. L'« émergence » est une croyance.

La définition simple de l'interaction, fournie ci-dessus, donne l'impression d'être élémentaire, mais elle conduit à des conclusions surprenantes. Prenez l'idée atomiste de Démocrite sous sa forme moderne : la nature est constituée de vide et de particules. La première conséquence est le *paradoxe de la description incomplète* : les expériences montrent qu'il y a des interactions entre le vide et les particules. Cependant, les interactions représentent les différences, d'une part, entre les parties et le tout, dans cette situation entre le vide et les particules, et le tout de l'autre. Nous en avons donc déduit que la nature n'est pas constituée uniquement de vide et de particules.

La deuxième conséquence est le *paradoxe de la description surcomplète* : les expériences démontrent aussi que les interactions se produisent à travers l'échange de particules. Toutefois, nous avons déjà comptabilisé les particules comme des briques fondamentales. Ceci signifie-t-il que la description de la nature par le vide et les particules soit

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 254 s une surdescription, comptant deux fois les choses ?

Nous résoudrons ces deux paradoxes dans la dernière partie de notre ascension Page ?? montagneuse.

Qu'est-ce que l'existence ?

> « Vous savez ce que j'aime le plus ?
> Les questions de rhétorique. »

Réf. 196 Supposez qu'un ami vous dise : « J'ai vu une *orque* aujourd'hui ! » Vous demanderiez naturellement à quoi elle ressemblait. Quelle réponse attendons-nous ? Nous nous attendons à quelque chose comme « c'est un animal doté d'un certain nombre de têtes similaires à un X, reliées à un corps bâti comme un Y, avec des ailerons faits comme un Z, il émet des sons comme un U et donne la même sensation au toucher qu'un V » – les lettres indiquant un autre animal ou objet donné. D'une manière générale, dans le cas d'un objet, cette scène tirée du voyage de Darwin en Amérique du Sud montre que, afin de se parler les uns aux autres, nous avons en premier lieu besoin de certains concepts élémentaires et communs (« animal », « tête », « aile », etc.). De surcroît, pour la définition d'une nouvelle entité, nous avons besoin d'une caractérisation de ses parties (« taille », « couleur »), de la manière dont ces parties sont reliées les unes aux autres et de la manière dont le tout interagit avec le monde extérieur (« toucher », « son »). En d'autres termes, pour qu'un objet puisse exister, nous devons être capables de dresser une liste des relations qu'il entretient avec le monde extérieur. Un objet existe si nous pouvons interagir Défi 255 s avec lui. (L'observation est-elle suffisante pour déterminer l'existence ?)

Pour un concept abstrait, tel que le « temps » ou une « supercorde », la définition de l'existence doit être peaufinée au moins superficiellement : l'*existence (physique) est la capacité à décrire fidèlement les interactions*. Cette définition s'applique aux arbres, au temps, aux particules virtuelles, aux nombres imaginaires, à l'entropie et ainsi de suite. Il ne rime donc à rien de discuter pour savoir si un concept physique « existe » ou s'il est « uniquement » une abstraction utilisée comme instrument pour les descriptions des observations. Les deux possibilités se rejoignent. Le seul sujet de discorde peut être de savoir si la description fournie par un concept est *précise* ou non.

Pour les concepts mathématiques, la notion d'existence possède une signification quelque peu différente : on dit qu'un concept mathématique existe s'il ne possède aucune contradiction intrinsèque. C'est une condition requise beaucoup plus faible que l'existence physique. Il est donc incorrect de déduire l'existence physique à partir de l'existence mathématique. C'est une erreur fréquente : depuis l'époque de Pythagore on a souvent stipulé que, puisque les concepts mathématiques existent, ils doivent par conséquent exister aussi dans la nature. Historiquement, cette confusion s'est présentée dans les affirmations que les orbites planétaires « doivent » être circulaires, que la forme des planètes « doit » être sphérique ou que l'espace physique « doit » être euclidien. Aujourd'hui, cela se produit encore avec les déclarations que l'espace et le temps « doivent » être continus et que la nature « doit » être décrite par des ensembles. Dans toutes ces situations, le raisonnement est faux. En réalité, les tentatives incessantes pour déduire l'existence physique à partir de l'existence mathématique empêchent de montrer que le contraire est vrai : une réflexion rapide montre que l'existence mathématique est un cas

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Défi 256 s particulier de l'existence physique.

Nous remarquons qu'il y a également une forme distincte d'existence, à savoir l'*existence psychologique*. On peut dire qu'un concept existe psychologiquement s'il décrit l'expérience intérieure humaine. Donc un concept peut exister psychologiquement même s'il n'existe pas physiquement. Il est facile de découvrir des exemples tirés des re-
Défi 257 s ligions ou des structures qui décrivent des expériences privées. Les mythes, les légendes et les bandes dessinées définissent également des concepts qui existent uniquement de manière psychologique, et non physique. Dans notre promenade, à chaque fois que nous parlons de l'existence, nous sous-entendons qu'il s'agit uniquement de l'existence physique.

Les choses existent-elles ?

> Wer Wissenschaft und Kunst besitzt,
> Hat auch Religion ;
> Wer jene beiden nicht besitzt,
> Der habe Religion*.
>
> Johann Wolfgang von Goethe, *Les Xénies apprivoisées, IX*

En utilisant la définition ci-dessus de l'existence, cette question devient soit triviale soit imprécise. Elle est triviale au sens où les choses existent nécessairement si elles décrivent des observations, puisqu'elles ont été définies de cette manière. Mais peut-être que celui qui pose la question veut dire : la réalité existe-t-elle indépendamment de l'observateur ?

En utilisant ce que nous venons de dire, cette interrogation peut être reformulée ainsi : « les choses que nous observons existent-elles indépendamment de l'observation ? » Après des millénaires de discussions intensives menées par des philosophes professionnels, des logiciens, des sophistes et des amateurs, la réponse demeure toujours la même : c'est « oui », parce que le monde n'a pas changé après le décès de notre arrière-grand-mère. La disparition des observateurs ne semble pas altérer l'Univers. Ces découvertes expérimentales peuvent être corroborées en introduisant la définition de l'« existence » dans la question, laquelle devient alors : « les choses que nous observons interagissent-elles avec d'autres aspects de la nature lorsqu'elles n'interagissent pas avec les gens ? » La réponse est évidente. Des livres de vulgarisation récents sur la mécanique quantique fantasment sur l'importance de la « conscience » des observateurs – quoi que ce terme puisse vouloir dire. Ils fournissent de jolis exemples d'auteurs qui se considèrent eux-mêmes comme irremplaçables, ayant apparemment perdu l'aptitude à se percevoir comme partie intégrante d'une plus grande entité.

Bien sûr, il existe d'autres opinions concernant l'existence des choses. La plus célèbre est celle de l'Irlandais George Berkeley (1685–1753) qui comprit à juste raison que les réflexions fondées sur l'observation seule, si elles étaient extrapolées, ébranleraient le fondement de l'organisation religieuse dont il était un des dirigeants supérieurs. Pour contrecarrer cette tendance, il publia en 1710 *Un traité concernant les principes de la*

* Celui qui possède la science et l'art possède aussi la religion. Celui qui ne les possède pas tous les deux, puisse-t-il avoir la religion !

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

connaissance humaine, un ouvrage réfutant l'existence du monde matériel. Ce livre réactionnaire devint largement connu dans les cercles d'initiés (c'était une époque où peu de livres étaient écrits) bien qu'il fût fondé sur une idée fondamentalement déficiente : elle suppose que le concept de l'« existence » et celui du « monde » peuvent être définis indépendamment l'un de l'autre. (Vous pourriez être tentés de réaliser cet exploit.)

Défi 258 e

Berkeley avait deux objectifs lorsqu'il écrivit son livre. Premièrement, il tenta de renier la capacité des gens à formuler des jugements sur la nature ou sur toute autre matière *à partir de leur propre expérience*. Deuxièmement, il tenta également de renier la *portée ontologique* de la science, c'est-à-dire les conclusions que nous pouvons esquisser à partir de l'expérience sur les questions concernant l'existence humaine. Bien que Berkeley soit généralement méprisé de nos jours, il parvint vraiment à accomplir son principal objectif : il fut l'initiateur de l'idée selon laquelle la science et la religion ne se contredisent pas, mais sont *complémentaires* l'une de l'autre. Par religion, Berkeley ne voulait pas sous-entendre moralité ou spiritualité : chaque scientifique est un ami de ces deux démarches. Berkeley voulait faire comprendre, par religion, que l'ensemble courant des croyances qu'il voulait mettre en relief est au-dessus des déductions de la raison. Cette expression largement citée, elle-même une croyance, est, encore de nos jours, toujours pieusement ressassée par de nombreuses personnes. Néanmoins, lorsque nous enquêtons sur l'origine du mouvement, toutes sortes de croyances se tiennent sur le chemin, y compris celle-ci. Emporter des croyances avec soi, c'est comme emporter des bagages encombrants : ils nous empêchent d'atteindre le sommet de la Montagne Mouvement.

Le néant existe-t-il ?

> « Le professeur : « Qu'y a-t-il entre le noyau et les électrons ? »
> L'étudiant : « Rien, juste de l'air ». »

> « Natura abhorret vacuum*. »
>
> Antiquité

Dans les discussions philosophiques, le « *néant* » est généralement défini comme étant la « non-existence ». Nous jouons alors avec les mots lorsque nous demandons de répondre par oui ou non à la question « le néant existe-t-il ? ». L'expression « l'existence de la non-existence » est soit une contradiction dans les mots, soit une définition pour le moins confuse : ce sujet ne semblerait pas être d'un grand intérêt. Toutefois, des questions analogues surgissent en physique, et un physicien devrait être préparé pour faire la différence entre celles-ci et la précédente. Un vide existe-t-il ? L'espace vide existe-t-il ? Ou bien le monde est-il « plein » partout, comme le maintenait le biologiste plus conservateur Aristote ? Par le passé, des gens ont été sacrifiés pour avoir donné une réponse qui était insupportable pour les autorités.

Il n'est pas évident, mais il est néanmoins important, que les concepts physiques modernes de « vide » et d'« espace vide » ne représentent pas la même chose que le concept philosophique de « néant ». Le « vide » n'est pas défini comme étant la « non-existence » : au contraire, il est défini comme étant l'absence de matière et de rayonnement. Le vide

* La nature a horreur du vide.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est une entité dotée de propriétés observables spécifiques, tels que son nombre de dimensions, ses constantes électromagnétiques, sa courbure, sa masse évanescente, son interaction avec la matière par le truchement de la courbure et à travers son influence sur la désintégration, etc. (Un tableau des propriétés du vide physique est donné à la page 108.) Historiquement, il fallut beaucoup de temps pour éclaircir la distinction qui existe entre un vide physique et un néant philosophique. Les gens confondirent ces deux concepts et débattirent de l'existence du vide durant plus de deux mille ans. Les premiers à affirmer qu'il existait, tentant audacieusement d'outrepasser la contradiction logique qui existe au niveau de la réalité physique sous-jacente, furent Leucippe et Démocrite, les penseurs les plus courageux de l'Antiquité. Leurs spéculations suscitèrent en retour la réaction virulente d'Aristote, qui rejeta le concept de vide. Aristote et ses disciples véhiculèrent la croyance selon laquelle *la nature a horreur du vide*.

Ce débat prit une nouvelle tournure au cours du dix-septième siècle, lorsque la première méthode expérimentale permettant de réaliser un vide fut inventée par Torricelli*. En utilisant du mercure dans un tube en verre, il produisit le premier vide de laboratoire. Défi 259 s Pouvez-vous deviner comment ? Des arguments allant à l'encontre de l'existence du vide apparurent à nouveau autour de 1900, lorsqu'on argumenta que la lumière avait besoin de l'« éther » pour se propager, en utilisant pratiquement les mêmes prétextes que ceux utilisés deux cents ans auparavant, mais avec des termes différents. Cependant, les expériences ne parvinrent pas à déceler l'une des propriétés supposées de ce concept défini de manière vague. Les expériences liées au domaine de la relativité générale montrèrent qu'un vide peut bouger – quoique d'une manière radicalement différente de la façon selon laquelle l'éther était supposé bouger –, que le vide peut être courbé, mais qu'il tend alors à retrouver sa forme initiale. Ensuite, vers la fin du vingtième siècle, la théorie quantique des champs argumenta une nouvelle fois contre l'existence d'un véritable vide et en faveur d'un espace empli de paires de particule–antiparticule virtuelles. Ce Page ?? débat s'acheva dans les discussions tournant autour de la constante cosmologique.

La question « le vide existe-t-il ? » ne sera définitivement résolue que dans la dernière Page ?? partie de cette promenade, d'une manière plutôt éblouissante.

* Evangelista Torricelli (n. Faenza 1608, d. -Florence 1647) fut un physicien italien, élève et héritier de Galilée. L'unité de pression (qui ne fait pas partie du SI) qui prit son nom est le « torr ».

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La nature est-elle infinie ?

> Il est évident, et nos sens l'attestent, que dans ce monde certaines choses se meuvent. Or, tout ce qui se meut est mû par un autre... Donc, si la chose qui meut est mue elle-même, il faut qu'elle aussi soit mue par une autre, et celle-ci par une autre encore. Or, on ne peut ainsi continuer à l'infini, car dans ce cas il n'y aurait pas de moteur premier, et il s'ensuivrait qu'il n'y aurait pas non plus d'autres moteurs, car les moteurs seconds ne meuvent que selon qu'ils sont mus par le moteur premier, comme le bâton ne meut que s'il est mû par la main. Donc il est nécessaire de parvenir à un moteur premier qui ne soit lui-même mû par aucun autre, et un tel être, tout le monde comprend que c'est Dieu.
>
> Thomas d'Aquin (v. 1225–1274) *Somme Théologique (Summa Theologica)*, I, q. 2.

La plupart des discussions modernes concernant la théorie des ensembles se concentrent sur les manières de définir le mot « ensemble » pour divers types de collections infinies. Pour la description du mouvement, cela conduit à nous poser deux questions : l'Univers est-il infini ? Est-ce un ensemble ? Commençons par la première. En éclairant cette question à partir de différents angles de vue, nous découvrirons rapidement que c'est à la fois simple et imprécis.

Avons-nous besoin de quantités infinies pour décrire la nature ? C'est assurément le cas en physique classique et quantique, par exemple pour l'espace-temps. Est-ce nécessaire ? Nous pouvons déjà avancer quelques idées.

Tout ensemble peut être fini selon un aspect et infini selon un autre. Par exemple, il est possible d'avancer le long d'une distance mathématique finie en une quantité de temps infinie. Il est également possible de voyager le long de n'importe quelle distance que ce soit en une quantité donnée de temps mathématique, faisant de la vitesse infinie une possibilité, même si la relativité est prise en compte, comme il a été expliqué plus tôt.

Page 41

Malgré l'utilisation des infinis, les scientifiques sont toujours limités. Nous avons vu plus haut que de nombreux types d'infinis existent. Cependant, aucun infini plus grand que le cardinal des nombres réels ne joue un rôle en physique. Aucun espace fonctionnel ou espace des phases en physique classique et aucun espace de Hilbert en théorie quantique ne possède de cardinal plus élevé. En dépit de l'aptitude des mathématiciens à définir des espèces beaucoup plus vastes d'infinis, la description de la nature n'en a pas besoin. Même les descriptions du mouvement les plus élaborées ne font appel qu'à l'infini des nombres réels.

Page 183

Réf. 183

Mais après tout est-il possible de dire *de la nature* ou de l'un de ses aspects qu'elle est véritablement *infinie* ? Une telle proposition peut-elle être compatible avec les observations ? Non. Il est évident que toute déclaration qui proclame que quelque chose dans la nature est infini constitue une croyance, et n'est pas confirmée par les observations. Nous éliminerons patiemment cette conviction par la suite.

Défi 260 s

La possibilité d'introduire des infinis artificiels rend toute discussion sur le fait de savoir si l'humanité est proche de « l'achèvement de la science », plutôt délicate. La quan-

Réf. 184

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

tité de connaissance et le temps nécessaires pour y parvenir sont sans rapport. En fonction de la vitesse à laquelle nous progressons à travers celle-ci, la fin de la science peut être proche ou inaccessible. En pratique, les scientifiques ont ainsi le pouvoir de *rendre* la science infinie ou non, par exemple en réduisant l'allure à laquelle les progrès sont réalisés. Puisque les scientifiques ont besoin de financements pour pouvoir travailler, nous pouvons deviner quel prétexte ils avancent généralement.

En bref, nous ne pouvons pas démontrer que l'Univers est infini. Mais peut-il être *fini* ? À première vue, ce serait la seule possibilité qui nous reste. (Cela ne l'est pas, comme nous le verrons.) Mais bien que de nombreuses personnes aient tenté de décrire l'Univers comme étant fini dans tous ses aspects, personne n'a encore réussi dans cette entreprise. Afin de comprendre les écueils qu'ils ont rencontrés, nous allons continuer avec l'autre question soulevée ci-dessus.

L'Univers est-il un ensemble ?

Une simple observation nous interroge sur le fait de savoir si l'Univers est un en-
Réf. 197 semble. Depuis 2 500 ans, on affirme que l'Univers est fait de vide et de particules. Cela implique que celui-ci est constitué d'un certain *nombre* de particules. La personnalité qui a porté cette conclusion jusqu'à son paroxysme est probablement l'astrophysicien anglais Arthur Eddington (1882–1944), qui a écrit :

Réf. 198
> Je pense qu'il y a 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961 181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425 076 185 631 031 296 protons dans l'Univers et le même nombre d'électrons.

Eddington fut maintes et maintes fois ridiculisé pour cette phrase et pour ses convictions qui aboutissaient à celle-ci. Ses arguments étaient en réalité fondés sur ses préférences personnelles pour certains nombres privilégiés. Cependant, nous ne devrions pas rire trop précipitamment. En fait, pendant 2 500 ans, presque tous les scientifiques ont eu la même ligne de pensée, la seule différence étant qu'ils n'avaient donné aucune valeur à ce nombre précis ! En réalité, *tout autre nombre* placé dans la phrase antérieure aurait été aussi ridicule. Le fait d'éviter de spécifier ce nombre représente juste une manière de se dérober lâchement à la tâche consistant à faire face à cet aspect nébuleux de la description de la nature en termes de particules.

Y a-t-il un nombre précis de particules dans la nature ? Si l'affirmation d'Eddington vous a fait sourire ou vous a fait hocher la tête, cela pourrait vouloir dire que vous croyez instinctivement que la nature n'est pas un ensemble. En est-il ainsi ? Toutes les fois que nous définissons l'Univers comme l'intégralité des événements, ou comme la collection de tous les points de l'espace-temps et des objets, nous sous-entendons que les points de l'espace-temps peuvent être distingués, que les objets peuvent être distingués et que les deux peuvent être discernés l'un de l'autre. Nous supposons ainsi que la nature est séparable et constitue un ensemble. Mais est-ce correct ? Cette question est fondamentale. L'aptitude à distinguer les points de l'espace-temps et les particules les uns des autres est souvent dénommé la *localité*. Donc l'Univers est séparable ou est un ensemble si et seulement si notre description de celui-ci est locale*. Et dans la vie quotidienne, la localité

* En mécanique quantique aussi, d'autres définitions moins claires de la localité sont utilisées. Nous les mentionnerons dans la partie quantique de ce texte. Le problème soulevé ici est différent, plus fondamental,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est observée sans aucune exception.

Dans la vie de tous les jours, nous observons aussi que la nature est séparable et, en même temps, un tout. C'est un « vaste nombre de constituants qui peut être imaginé comme un tout » : dans la vie courante la nature est un ensemble. En vérité, la caractéristique fondamentale de la nature, c'est sa diversité. Dans le monde qui nous entoure, nous remarquons des changements et des différences : nous observons que la nature est séparable. En outre, tous les aspects de la nature se rassemblent : il y a des relations entre ces aspects, souvent appelées « lois », qui déclarent que ces aspects distincts de la nature forment un tout, que l'on appelle généralement l'Univers.

Autrement dit, la possibilité de décrire les observations à l'aide de « lois » découle de notre expérience de la séparabilité de la nature. Plus la séparabilité est caractérisée de manière précise, plus les « lois » peuvent être formulées de manière détaillée. En fait, si la nature n'était pas séparable ou n'était pas unifiée, nous ne pourrions pas expliquer pourquoi les pierres chutent vers le bas. Donc nous sommes conduits à conjecturer que nous devrions être capables de déduire toutes les « lois » à partir du fait que la nature est séparable.

De plus, seule la séparabilité nous permet finalement de décrire la nature. Une description est une classification, c'est-à-dire une application entre certains aspects de la nature et certains concepts. Tous les concepts sont des ensembles et des relations. Puisque l'Univers est séparable, il peut être décrit à l'aide d'ensembles et de relations. Ils représentent tous les deux des entités séparables ayant des parties distinctives. Une description précise est communément appelée une compréhension. En résumé, l'Univers est compréhensible uniquement parce qu'il est séparable.

Qui plus est, seule la séparabilité de l'Univers fait de notre cerveau un instrument aussi efficace. Le cerveau est construit grâce à un grand nombre de composantes interconnectées, et seule sa séparabilité permet au cerveau de fonctionner. Autrement dit, la pensée est possible uniquement parce que la nature est séparable.

Finalement, seule la séparabilité de l'Univers nous permet d'établir une distinction entre des référentiels, et donc de définir toutes les symétries à la base des descriptions physiques. Et de la même manière que la séparabilité est, ainsi, nécessaire pour les descriptions *covariantes*, l'unité de la nature est nécessaire pour les descriptions *invariantes*. En d'autres termes, ce que nous appelons les « lois » de la nature sont basées sur l'expérience que la nature est à la fois séparable et unifiable – c'est-à-dire un ensemble.

Ces arguments semblent démontrer de façon merveilleuse que l'Univers est un ensemble. Toutefois, ils s'appliquent uniquement à l'expérience quotidienne, aux dimensions ordinaires et aux énergies courantes. La nature est-elle également un ensemble *en dehors* des domaines de la vie de tous les jours ? Les objets sont-ils différents aux autres énergies, même lorsqu'ils sont observés avec la précision la plus élevée possible ? Nous avons trois problèmes en suspens pour l'instant : le problème du nombre de particules présentes dans l'Univers, la définition circulaire de l'espace, du temps et de la matière, et le problème de savoir si le fait de décrire la nature comme étant constituée de particules et de vide constitue une surdescription, une sous-description, ou ni l'une ni l'autre. Ces trois énigmes font planer le doute sur le fait de savoir si les objets sont dénombrables à toutes les énergies. Nous découvrirons dans l'ultime partie de notre as-

et non relié à celui de la théorie quantique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Page ?? cension montagneuse que ce n'est pas le cas dans la nature. Les conséquences seront considérables et captivantes. Par exemple, essayez de répondre à ceci : si l'Univers n'est Défi 261 s pas un ensemble, qu'est-ce que cela signifie pour l'espace et le temps ?

L'Univers existe-t-il ?

> Chaque esprit progressiste est contrarié par un millier d'hommes résignés à défendre le passé.
> Maurice Maeterlink

D'après la définition ci-dessus, l'existence d'un concept signifie qu'il est utile pour décrire les interactions. Il existe deux définitions communes du concept d'« Univers ». Selon la première, c'est la collection de toute la matière, l'énergie et l'espace-temps. Mais cet usage aboutit à une étrange conséquence : puisque rien ne peut interagir avec cette totalité, nous ne pouvons pas proclamer que l'Univers existe.

Considérons donc le point de vue plus restrictif, à savoir que l'Univers représente seulement l'intégralité de la matière et de l'énergie. Mais dans ce cas aussi il est impos- Défi 262 s sible d'interagir avec celui-ci. Pouvez-vous citer quelques arguments allant dans ce sens ?

En résumé, nous parvenons à la conclusion que l'Univers n'existe pas. Nous confirme- Page ?? rons effectivement ce résultat avec plus de détails un peu plus tard dans notre excursion. En particulier, puisque l'Univers n'existe pas, il est même ridicule d'essayer de savoir *pourquoi* il existe. La meilleure réponse pourrait être : c'est à cause des idées vertes sans Réf. 151 couleur, qui dorment furieusement.

Qu'est-ce que la création ?

> (Gigni) De nihilo nihilum, in nihilum nil posse reverti*.
> Réf. 199 Perse, *Satires*, III, v. 83-84.

> Anaxagore, découvrant l'ancienne théorie selon laquelle rien ne provient du néant, décida d'abolir le concept de création et introduisit à sa place celui de discrimination. Il n'hésita pas à déclarer, en réalité, que toutes les choses sont mélangées aux autres et que la discrimination engendre leur croissance.
> Réf. 200 *Fragment anonyme*, Moyen Âge.

Nous entendons souvent parler du terme de « création » dans les discussions concernant la nature. Il est employé dans divers contextes avec des significations différentes.

Nous parlons de création en tant que caractérisation des réalisations humaines, comme nous l'observons dans une peinture d'artiste ou une dactylographie de secrétaire. Manifestement, c'est un type de changement. Dans la classification du changement introduite au début de notre excursion, les changements mentionnés représentent des mouvements d'objets, tels que les électrons dans le cerveau, les molécules dans les muscles, les matériaux composant la peinture ou les électrons à l'intérieur de l'ordinateur. Ce type

* « Rien ne s'engendre de rien, rien ne peut retourner à rien. » (trad. Henri Clouard, 1934), « Rien ne sort du néant, et rien ne s'y replonge » (trad. Jules Lacroix, 1846).

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de création est ainsi un cas particulier de mouvement.

Nous parlons également de création au sens biologique ou social, comme dans « la création de la vie », « la création d'une entreprise » ou « la création de la civilisation ». Ces événements sont des formes de croissance ou d'auto-organisation. À nouveau, ils représentent des cas particuliers de mouvement.

Les physiciens nous disent souvent qu'une ampoule « crée » de la lumière ou qu'une pierre qui chute dans un étang « crée » des vagues sur l'eau. De manière similaire, ils
Page ?? parlent de « création de paires » de matière et d'antimatière. Le fait que tous ces processus constituent des types particuliers de mouvement, à savoir l'excitation de champs, a
Page ?? constitué une des découvertes importantes de la physique.

Dans les ouvrages de vulgarisation de la cosmologie, la « création » est également un terme qui s'applique couramment, ou plutôt qui s'applique mal, au *Big Bang*. Néanmoins, l'expansion de l'Univers est un exemple pur de mouvement et, contrairement à une mauvaise compréhension courante, la description du Big Bang ne contient que des processus qui tombent dans l'une des trois catégories précédentes, comme indiqué dans le chapitre
Page 226 sur la relativité générale. Le Big Bang n'est pas un exemple de création. La cosmologie quantique apporte des arguments supplémentaires pour soutenir le fait que le terme naïf
Page 225 de « création » n'est pas applicable au Big Bang. *Primo*, il apparaît que celui-ci ne fut pas un événement. *Secundo*, il ne fut pas un commencement. *Tertio*, il ne constitue pas un *choix* tiré d'un large ensemble de possibilités. Le Big Bang ne possède aucune des propriétés attribuées au terme « création ».

En résumé, nous concluons que, dans toutes les situations, *la création est un type de mouvement*. (La même chose s'applique aux notions de « disparition » et d'« annihilation ».) Aucun autre type de création n'est observé dans la nature. En particulier, le sens naïf de « création », à savoir « l'apparition à partir de rien » – *ex nihilo* en latin – n'est jamais observé dans la nature. Tous les types observés de « création » exigent la présence de l'espace, du temps, des forces, de l'énergie et de la matière pour qu'ils puissent se réaliser. La création requiert quelque chose qui existe déjà, afin de pouvoir se produire. De surcroît, une exploration minutieuse montre qu'aucun processus physique et aucun exemple de mouvement ne possèdent un commencement. Notre promenade nous démontrera que la nature nous interdit de localiser des commencements. Cette propriété seule est suffisante pour montrer que la « création » n'est pas un concept applicable à ce qui se passe dans la nature. Pire encore, la création se rapporte aux systèmes physiques uniquement. Nous découvrirons que la nature n'est pas un système et que les systèmes n'existent pas.

Le contraire de la création, c'est la *conservation*. Les propositions centrales de la physique sont des théorèmes de conservation : pour l'énergie, la masse, la quantité de mouvement, le moment cinétique, la charge, etc. En réalité, chaque « loi » de conservation représente une répudiation précise et exacte du concept de création. L'ancienne idée grecque des atomes renfermait déjà ce rejet. Les atomistes affirmaient qu'il n'y a pas de création ni de disparition, mais uniquement un mouvement des atomes. Chaque transformation de la matière est un mouvement d'atomes. Autrement dit, l'idée de l'atome était une conséquence directe de la négation de la création. Il a fallu à l'humanité plus de 2 000 ans pour qu'elle cesse d'enfermer des gens en prison pour avoir évoqué l'idée des atomes,
Page 229 comme cela s'est produit pour Galilée.

Cependant, il existe une exception dans laquelle le concept naïf de création s'applique

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vraiment : c'est ce que font les magiciens sur scène. Lorsqu'un prestidigitateur fait apparaître un lapin, sorti de nulle part, nous ressentons réellement qu'il y a de la « création » à partir de rien. Sous sa meilleure facette, une telle magie représente une forme d'amusement, mais sous son pire côté, c'est un mauvais usage de la crédulité. L'idée que l'Univers découle de l'un de ces deux aspects ne semble pas séduisante. Tout compte fait, cependant, peut-être qu'en considérant l'Univers comme un ultime divertissement nous pourrions nous ouvrir à une approche de la vie plus fraîche et plus créative.

Voltaire (1694–1778) diffusa un argument, allant à l'encontre de la création, souvent utilisé par le passé : nous ne savons pas si la création a eu lieu ou non. Aujourd'hui la situation est différente : nous *savons* qu'elle n'a *pas* eu lieu, parce que la création est un type de mouvement et, comme nous le verrons dans la partie concluant notre ascension montagneuse, le mouvement n'existait pas aux premiers instants du Big Bang.

Avez-vous déjà entendu l'expression « la création des lois de la nature » ? C'est un des exemples les plus fréquents de méconnaissance. En tout premier lieu, cette expression confond les « lois » avec la nature elle-même. Une description ne s'identifie pas à la chose elle-même : tout le monde sait que donner à la personne que l'on aime une description d'une rose, c'est différent que de donner une véritable rose. Deuxièmement, cette expression implique que la nature est telle qu'elle est parce qu'elle est d'une certaine manière « obligée » de suivre ces « lois » – un point de vue plutôt puéril et, qui plus est, incorrect. Et troisièmement, cette expression suppose qu'il est possible de « créer » des descriptions de la nature. Mais une « loi » est une description, et par définition une description ne peut pas être créée : donc l'expression est complètement vide de sens. La formule « la création des lois de la nature » représente l'archétype de la pensée confuse.

Il se pourrait bien que qualifier un grand artiste de « créatif » ou de « divin », comme on avait coutume de la faire à la Renaissance, ne soit pas un blasphème, mais simplement un encouragement pour les divinités de tenter d'en faire autant. En réalité, à chaque fois que nous utilisons le terme « création » pour décrire n'importe quoi d'autre qu'une certaine forme de mouvement, nous sommes en train d'abandonner à la fois les observations et la raison humaine. C'est l'un des derniers pseudo-concepts de notre époque moderne : aucun expert du mouvement ne devrait l'oublier. Il est impossible d'escalader la Montagne Mouvement sans se débarrasser de la « création ». Ce n'est pas facile. Nous rencontrerons la prochaine tentative pour faire renaître la création dans l'étude de la théorie quantique.

Page ??

> Chaque acte de création est avant tout un acte de destruction.
>
> Pablo Picasso

La nature est-elle inventée ?

> Au commencement l'Univers fut créé. Ce qui mit en colère beaucoup de gens et fut largement considéré comme étant une mauvaise idée.
>
> Douglas Adams

La tendance à induire la création d'un objet à partir de sa simple existence est répandue. Certaines personnes sautent sur cette conclusion à chaque fois qu'elles admirent un magnifique paysage. Cette habitude provient du triple préjugé qu'une scène magnifique implique une description complexe, ce qui implique en retour des instructions complexes

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

de conception, et ce qui souligne par conséquent un *dessein* fondamental caché.

Cette succession de réflexions contient plusieurs erreurs. Premièrement, en général, la beauté n'est pas une conséquence de la complexité. Habituellement c'est le contraire : en fait, l'étude du chaos et de l'auto-organisation a démontré comment des formes et des motifs magnifiquement complexes peuvent être engendrés à partir de descriptions extrêmement simples. En vérité, pour la plupart des objets façonnés par l'homme, les descriptions complexes impliquent en fait des processus de conception compliqués, un ordinateur représente un bon exemple d'objet complexe ayant un processus de production compliqué. Mais dans la nature, cette correspondance ne s'applique pas. Nous avons vu plus haut que même la quantité d'information nécessaire pour construire un corps humain est environ un million de fois plus petite que l'information stockée uniquement dans le cerveau. Des résultats analogues ont été découverts pour la structure des plantes et pour de nombreux autres exemples de modèles naturels. Les descriptions élémentaires qui se cachent derrière les apparentes complexités de la nature ont été, et sont toujours, dévoilées par l'étude de l'auto-organisation, du chaos, de la turbulence et des formes fractales. Dans la nature, les structures complexes dérivent de processus *simples*. Méfiez-vous de toute personne qui prétend que la nature possède une « complexité infinie » : en tout premier lieu, la complexité n'est pas une entité mesurable, en dépit des nombreuses tentatives pour la quantifier. De plus, tout système complexe connu peut être décrit par un nombre (proportionnellement) petit de paramètres et d'équations élémentaires. Finalement, rien dans la nature n'est infini.

Réf. 201

La deuxième erreur qui se trouve dans l'argumentation soutenant un dessein de la nature consiste à relier une description à une « instruction », et peut-être même à imaginer qu'une certaine « intelligence » inconnue est en train, d'une certaine manière, de tirer les ficelles de la scène du monde. L'étude de la nature a logiquement démontré qu'il n'y a aucune intelligence dissimulée et aucune instruction derrière les processus de la nature. Une instruction est une liste d'ordres donnée à un exécuteur. Mais il n'y a pas de directives dans la nature, et aucun exécuteur. Il n'existe pas de « lois » de la nature, mais seulement des descriptions de processus. Personne ne construit un arbre, cet arbre est une conséquence du mouvement des molécules qui le constituent. Les gènes présents dans l'arbre contiennent véritablement de l'information, mais aucune molécule ne se voit donner des instructions. Ce qui nous semble être des instructions sont juste des mouvements naturels de la part des molécules et de l'énergie, décrits par les mêmes modèles qui ont lieu dans les systèmes inertes. L'idée d'instruction tout entière – comme celle de « loi » de la nature – est une idéologie, née d'une analogie entre la monarchie, ou même la tyrannie, et un anthropomorphisme caractérisé.

La troisième erreur dans l'argumentation de cette intention est la suggestion qu'une description complexe d'un système implique un dessein sous-jacent. Ce n'est pas exact. Une description complexe implique uniquement que ce système possède une longue évolution derrière lui. La déduction exacte est : quelque chose de complexité importante existe, par conséquent il a *crû*, c'est-à-dire qu'il a été transformé par le biais de l'introduction (modérée) d'énergie au cours du temps. Cette déduction s'applique aux fleurs, aux montagnes, aux astres, à la vie, aux êtres, aux montres, aux livres, aux ordinateurs, et aux œuvres d'art. En réalité, elle s'applique à tous les objets présents dans l'Univers. La complexité de notre environnement laisse ainsi présager l'âge considérable de celui-ci et nous rappelle la brièveté de notre vie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Le manque de complexité fondamentale et l'absence d'instructions dans la nature entérinent un résultat élémentaire : il n'existe pas une seule observation dans la nature qui entraîne ou exige un dessein ou une création. D'un autre côté, la diversité et l'intensité des phénomènes de la nature nous emplissent d'un profond respect. La beauté sauvage de la nature nous montre quelle *minuscule* partie de celle-ci nous sommes réellement, à la fois dans l'espace et dans le temps*. Nous explorerons cette expérience en détail. Nous découvrirons que rester ouvert aux phénomènes naturels dans toute leur irrésistible splendeur demeure crucial pour le reste de notre aventure.

Page ??

> « Il y a une séparation entre l'État et l'Église, mais pas encore entre l'État et la science. »
> Paul Feyerabend

Qu'est-ce qu'une description ?

> « En théorie, il n'y a pas de différence entre la théorie et la pratique. En pratique, si. »

En suivant un usage courant du vocabulaire, une description d'une observation est une liste des détails la concernant. L'exemple de l'orque cité plus haut le montre clairement. En d'autres termes, une *description* d'une observation est l'acte consistant à la classifier, c'est-à-dire à comparer, par identification ou par différenciation, cette observation avec toutes celles déjà réalisées. Une description est une classification. En bref, *décrire signifie considérer comme un élément d'un ensemble plus vaste*.

Page 219

Une description peut être comparée à l'indication « vous êtes ici » située sur la carte touristique d'une ville. Parmi un ensemble de positions possibles, l'indication « vous êtes ici » donne la position véritable. De manière similaire, une description met en relief la situation donnée par rapport à toutes les autres éventualités. Par exemple, la formule $a = GM/r^2$ est une description des observations qui associent le mouvement à la gravité, parce qu'elle classifie les accélérations observées a en fonction de la distance au corps central r et de sa masse M. En réalité, une telle description considère chaque cas spécifique comme un exemple d'un modèle général. L'habitude de généraliser est une raison qui explique le stoïcisme dérangeant, si fréquent, des scientifiques : lorsqu'ils observent quelque chose, leur formation professionnelle les fait généralement classifier cela comme un cas particulier d'un phénomène connu et donc les empêche d'être surpris ou d'être excités à son propos.

Une description est donc le contraire d'une *métaphore* : cette dernière est une analogie qui relie une observation à un autre cas *particulier* ; une description associe une observation à un cas *général*, comme une théorie physique.

* La quête d'un « sens » dans la vie ou dans la nature est une manière compliquée (et nécessaire) d'essayer de faire face à l'insignifiance de l'existence humaine.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

> Felix qui potuit rerum cognoscere causas,
> atque metus omnis et inexorabile fatum
> subjecit pedibus strepitumque acherontis avari.
> Virgile*

Motif, objectif et interprétation

> Der ganzen modernen Weltanschauung liegt die Täuschung zugrunde, daß die sogenannten Naturgesetze die Erklärungen der Naturerscheinungen seien**.
> Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.371

— Pourquoi les feuilles de la plupart des arbres sont-elles vertes ? Parce qu'elles absorbent la lumière rouge et bleue. Pourquoi absorbent-elles ces couleurs ? Parce qu'elles contiennent de la chlorophylle. Pourquoi la chlorophylle est-elle verte ? Parce que tous les types de chlorophylle contiennent du magnésium placé entre quatre groupes pyrroles, et cette combinaison chimique donne la couleur verte, en raison de ses niveaux quantiques d'énergie. Pourquoi les plantes contiennent-elles de la chlorophylle ? Parce que c'est ce que les plantes terrestres peuvent synthétiser. Pourquoi seulement cela ? Parce que toutes les plantes terrestres ont à l'origine évolué à partir des algues vertes, qui sont capables de synthétiser uniquement ce composé, et non les composés que l'on trouve dans les algues bleues ou rouges, que l'on rencontre également dans les océans.

— Pourquoi les enfants grimpent-ils aux arbres, et pourquoi certaines personnes escaladent-elles les montagnes ? À cause de la sensation qu'ils éprouvent au cours de cette activité : les sensations de réussite, l'acte symbolique d'aller vers le haut, le désir de parvenir à une vision plus étendue du monde sont des parties intégrantes de ce type d'aventure.

Les questions « pourquoi » dans ces deux derniers paragraphes montrent la différence générale qui existe entre les motifs et les objectifs (bien que ces deux termes ne soient pas précisément définis de la même manière par tout le monde). Un *objectif* ou une *intention* est une classification appliquée aux actions réalisées par des êtres humains ou des animaux ; à strictement parler, il désigne la recherche d'une sensation, à savoir l'accomplissement d'un certain type de satisfaction après l'achèvement de l'action. De l'autre côté, un *motif* est une relation particulière d'un fait avec le reste de l'Univers, généralement son passé. Ce que nous appelons un motif est toujours à l'extérieur de l'observation elle-même, tandis qu'un objectif est toujours interne à celle-ci.

Les motifs et les objectifs représentent les deux possibilités d'explication, c'est-à-dire les deux réponses possibles aux questions commençant par « pourquoi ». En général, la physique ne s'intéresse pas aux objectifs ou aux sentiments des gens, principalement

* « Heureux qui a pu connaître les causes des choses et qui a foulé aux pieds toutes les craintes, et l'inexorable destin, et le bruit de l'avare Achéron ! » (*Géorgiques*, Livre II, vers 490 ss.) Publius Vergilius Maro (70–19 av. J.-C.) dit Virgile, le grand poète romain, est l'auteur de l'Énéide. Achéron était la rivière traversée par ceux qui venaient de mourir et qui étaient en train de faire route vers les Enfers.

** Toute la conception moderne du monde est fondée sur l'illusion que les « lois de la nature » sont des explications de phénomènes naturels.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

parce que son but original, parler du mouvement avec précision, ne semble pas être réalisable dans ce domaine. Par conséquent, les explications *physiques* des faits ne sont jamais des objectifs, mais toujours des motifs. Une *explication physique* d'une observation est toujours la description de sa relation avec le reste de la nature*.

Réf. 202

Cela signifie – contrairement à une opinion répandue – qu'une question commençant par « pourquoi » est ouverte à l'investigation physique à partir du moment où elle demande un motif et non un objectif. En particulier, on peut répondre à des questions telles que « pourquoi les pierres tombent-elles vers le bas et non vers le haut ? » ou « pourquoi les électrons ont-ils telle valeur de masse, et pourquoi, après tout, ont-ils une masse ? » ou « pourquoi l'espace possède-t-il trois dimensions et non trente-six ? » puisqu'elles s'interrogent sur les connexions qui existent entre des observations particulières et celles plus générales. Bien sûr, toutes les requêtes pour avoir des explications n'ont pas encore été satisfaites, et il reste bien des problèmes à résoudre. Notre présent cheminement nous conduit, à partir de quelques réponses uniquement, à certaines des questions plus fondamentales à propos du mouvement.

La quête la plus générale d'explication dérive de la question : pourquoi l'Univers est-il tel qu'il est ? Ce sujet est abordé dans notre ascension montagneuse en utilisant les deux approches usuelles, à savoir :

Unification et démarcation

> « Tout sujet est un ; et, aussi vaste qu'il soit, il peut être renfermé dans un seul discours. »
>
> Buffon, *Discours sur le style*.

En étudiant les propriétés du mouvement, et en veillant constamment à accroître la précision de la description, nous découvrons que les explications sont généralement de deux types** :

— « C'est comme toutes les situations de ce type, celle-ci aussi est décrite par ... » Cette situation est reconnue comme étant un *cas particulier* d'un comportement général.
— « Si cette situation était différente, nous aurions une conclusion en contradiction avec les observations. » Cette situation est reconnue comme étant *la seule issue possible****.

Autrement dit, la première approche consiste à formuler les règles ou « lois » qui décrivent des quantités de plus en plus importantes d'observations, et de comparer cette observation donnée avec elles. Cette volonté est appelée l'*unification* de la physique –

---

* Il est primordial de remarquer que les objectifs *ne* sont *pas* mis de côté parce qu'ils sont du domaine de l'avenir, mais parce qu'ils représentent des anthropomorphismes inacceptables. En réalité, pour des systèmes déterministes, nous pouvons également dire que le futur est véritablement un *motif* pour le présent et le passé, une réalité que l'on oublie souvent.

Défi 263 s

** Est-ce que ce sont les seuls possibles ?

*** Ces deux cas ne doivent pas être confondus avec des phrases similaires qui *semblent* être des explications, mais qui n'en sont pas :

— « C'est comme la situation de ... » Une ressemblance avec un autre cas *unique* n'est *pas* une explication.
— « Si c'était différent, cela contredirait l'idée selon laquelle ... » Une contradiction avec une *idée* ou avec une théorie n'est *pas* une explication.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

par ceux qui l'affectionnent. Ceux qui ne l'aiment pas l'appellent le « réductionnisme ». Par exemple, la même règle décrit la trajectoire d'une balle de tennis, le mouvement des marées sur les rivages marins, la synchronisation des ères glaciaires, et le moment où la planète Vénus cesse d'être l'étoile du soir pour commencer à être celle du matin. Ces processus sont tous des conséquences de la gravitation universelle. De manière similaire, il n'est pas évident que la même règle décrive l'origine de la couleur des yeux, la formation de l'éclair, la digestion des aliments ou le fonctionnement du cerveau. Ces processus sont décrits par l'électrodynamique quantique.

L'unification réalise ses triomphes les plus impressionnants lorsqu'elle prédit une observation qui n'a pas été faite auparavant. Un exemple célèbre est l'existence de l'antimatière, prédite par Dirac quand il examinait les solutions d'une équation qui décrit le comportement précis de la matière courante.

La deuxième procédure dans la recherche des explications est l'élimination de toutes les autres possibilités imaginables en faveur de celle qui est vraiment correcte. Cette tentative ne possède pas de désignation unanimement acceptée : on pourrait l'appeler la *démarcation* des « lois » de la physique – pour ceux qui l'affectionnent. Les autres l'appellent l'« anthropocentrisme », ou plus simplement l'« arrogance ».

Lorsque nous découvrons que la lumière voyage d'une manière telle qu'elle met la plus courte durée possible pour parvenir à sa destination, quand nous décrivons le mouvement par un principe de moindre action, ou quand nous découvrons que les arbres sont ramifiés de telle sorte qu'ils parviennent à couvrir l'espace le plus vaste avec l'effort minimal, nous sommes en train d'utiliser une vision relative à la démarcation.

En résumé, l'unification, qui répond à des questions du type « pourquoi c'est ainsi », et la démarcation, qui répond à des questions du type « pourquoi ce n'est pas ainsi », sont caractéristiques du développement qui a eu lieu tout au long de l'épopée de la physique. Nous pouvons dire que les aspects duaux de l'unification et de la démarcation forment les qualités d'harmonisation et d'opposition de la physique. Ils représentent le désir de *tout savoir*.

Cependant, ni la démarcation ni l'unification ne peuvent expliquer l'Univers. Pouvez-
Défi 264 s vous voir pourquoi ? En fait, mis à part l'unification et la démarcation, il existe une troi-
Défi 265 s sième voie qui les fusionne et nous permet d'en dire plus concernant l'Univers. Pouvez-vous la trouver ? Notre promenade nous y conduira mécaniquement bientôt.

Les cochons, les singes et le principe anthropique

> « Das wichtigste Instrument des Wissenschaftlers ist der Papierkorb* ».

Le rêve d'accomplir la démarcation des modèles de la nature est plus intéressant lorsque nous suivons les conséquences de règles distinctes de la nature jusqu'à ce que nous les mettions en contradiction avec l'observation la plus remarquable : notre propre existence humaine. Dans ce cas particulier, ce programme de démarcation est souvent appelé le *principe anthropique* – d'après le mot grec ἄνθρωπος qui signifie « homme ».

Par exemple, si la distance Terre–Soleil était différente de ce qu'elle est, la variation de température qui en résulterait sur la Terre aurait rendu impossible l'émergence de la vie,

* L'instrument le plus important d'un scientifique est la corbeille à papier.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

laquelle a besoin d'eau liquide. De manière analogue, notre cerveau ne fonctionnerait pas si la Lune ne gravitait pas autour de la Terre. Il est également notoire que s'il y avait moins de grosses planètes dans le Système solaire, l'évolution des êtres humains aurait été impossible. Les grosses planètes dévient un grand nombre de comètes, les empêchant ainsi de frapper la Terre. La collision spectaculaire de la comète Shoemaker–Levy 9 avec Jupiter, l'événement astronomique de juillet 1994, fut un exemple de ce détournement d'une comète*.

De même, le principe anthropique parvient à ses succès les plus impressionnants lorsqu'il prédit des observations inédites. L'exemple le plus célèbre provient de l'étude des étoiles. Les atomes de carbone, comme tous les autres atomes excepté la majorité des atomes d'hydrogène, d'hélium et de lithium, se sont formés dans les étoiles par le biais de la fusion. En étudiant les mécanismes de la fusion en 1953, le célèbre astrophysicien britannique Fred Hoyle** découvrit que les noyaux de carbone ne pouvaient pas avoir été formés à partir des particules alpha présentes à l'intérieur des étoiles à des températures raisonnables, à moins qu'ils n'aient possédé un état excité ayant une section efficace plus importante. À partir de la réalité de notre existence, laquelle est fondée sur le carbone, Hoyle avait ainsi prévu l'existence d'un état excité précédemment inconnu pour le noyau
Réf. 203 de carbone. Et, en vérité, cet état excité fut découvert quelques mois plus tard par Willy Fowler***.

Sous sa forme *sérieuse*, le principe anthropique représente par conséquent la quête de déduction de la description de la nature à partir de la réalité expérimentale de notre
Réf. 204 existence. Dans la littérature populaire, cependant, le principe anthropique est souvent transformé de sa forme expérimentale simple, qui permet de déduire les modèles de la nature, à sa forme *pervertie*, un pot-pourri d'idées métaphysiques absurdes dans lesquelles tout un chacun y fait un amalgame de ses croyances préférées. Plus récemment, l'observation expérimentale de notre propre existence a été pervertie pour réintroduire l'idée de « dessein », c'est-à-dire que l'Univers a été construit dans le but de produire des êtres humains. Il est même souvent suggéré que le principe anthropique constitue une *explication* – un exemple grossier d'intoxication de l'information.

Comment pouvons-nous faire la distinction entre la forme sérieuse et la forme pervertie ? Nous commençons avec une observation. Nous aurions exactement les mêmes règles et modèles de la nature si nous utilisions l'existence des cochons ou des singes comme point de départ. Autrement dit, si nous parvenons à des conclusions *différentes* en utilisant le *principe porcin* ou le *principe simien*, nous sommes en train d'utiliser la forme pervertie du principe anthropique, sinon nous sommes en train d'employer sa

* Pour une collection d'images de cet événement, consultez par exemple le site Web garbo.uwasa.fi/pc/gifslevy.html.

** Fred Hoyle (n. Bingley 1915, d. -Yorkshire 2001), un important astronome et astrophysicien britannique, fut le premier et probablement le seul physicien qui ait fait une prédiction spécifique – à savoir l'existence d'un état excité du noyau de carbone – à partir du simple fait que les êtres humains existent. Anticonformiste inébranlable, il inventa l'expression « Big Bang » alors même qu'il n'acceptait pas l'évidence de celui-ci, et proposa un autre modèle, la théorie de l'« Univers stationnaire ». Son œuvre la plus importante et la plus reconnue concerne la formation des atomes à l'intérieur des étoiles. Il diffusa également la croyance que la vie fut apportée sur Terre par des microbes extraterrestres.

*** William A. Fowler (1911–1995) partagea le prix Nobel de physique en 1983 avec Subramanyan Chandrasekhar pour cette découverte et d'autres apparentées.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

forme sérieuse. (L'histoire du carbone 12 constitue donc un exemple de cette forme sérieuse.) Ce test est efficace parce qu'il n'existe pas de modèle, ou de « loi », connu dans la nature qui soit particulier aux êtres humains mais superflu pour les singes ou les cochons*.

> Er wunderte sich, daß den Katzen genau an den Stellen Löcher in den Pelz geschnitten wären, wo sie Augen hätten.
>
> Georg Christoph Lichtenberg**

Avons-nous besoin de causes et d'effets dans les explications ?

> Dans la nature il n'y a ni récompenses ni punitions – il y a des conséquences.
>
> Ivan Illich

> Le monde ne vous doit rien. Il était là le premier.
>
> Mark Twain

> Aussi cruel, vilain et méchant que vous puissiez être, ce n'est pas grave : à chaque fois que vous prenez votre respiration vous rendez une fleur heureuse.
>
> Mort Sahl

Historiquement, les deux termes « cause » et « effet » ont joué un rôle important dans les discussions philosophiques. En particulier, au cours de l'avènement de la mécanique moderne, il était primordial de faire remarquer que chaque effet possède une cause, afin de distinguer la réflexion précise et exacte de la pensée fondée sur des croyances, tels les « miracles », les « divines surprises » ou l'« évolution à partir de rien ». Il était également essentiel de souligner que les effets sont différents des causes : cette distinction élimine les pseudo-explications comme le fameux exemple de Molière où le médecin explique à son patient en termes raffinés que les somnifères marchent parce qu'ils contiennent un principe dormitif.

Réf. 205

Mais en physique, les concepts de cause et d'effet ne sont plus utiles. Nous exprimons le fait que les miracles n'apparaissent pas chaque fois que nous utilisons des symétries et des théorèmes de conservation. L'observation que la cause et l'effet se différencient l'un de l'autre est intrinsèque à toute équation d'évolution. De surcroît, les concepts de cause et d'effet ne sont pas clairement définis : par exemple, il est particulièrement ardu de définir ce que l'on entend par une cause, par opposition à plusieurs d'entre elles, et de même pour un ou plusieurs effets. Ces deux termes sont impossibles à quantifier et à mesurer. Autrement dit, bien que la « cause » et l'« effet » puissent être utiles dans la

* Bien que les singes ne semblent pas être de bons physiciens, comme le décrit le texte de D. J. Povinelli, *Folk Physics for Apes : the Chimpanzee's Theory of How the World Works*, Oxford University Press, 2000.

** « Il s'émerveillait de voir que les chats ont la peau trouée de deux orifices, précisément à la place des yeux. » Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) fut un physicien et intellectuel allemand, professeur à Göttingen, encore connu aujourd'hui pour ses satires et ses aphorismes caustiques extrêmement nombreux. Avec d'autres personnalités de son époque, Lichtenberg tourna en dérision tous ceux qui soutenaient que l'Univers était exactement conçu sur mesure pour l'homme, une idée que l'on retrouve fréquemment dans la sphère nébuleuse du principe anthropique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vie privée pour faire la distinction entre des événements qui se succèdent régulièrement les uns aux autres, ils ne sont pas indispensables en physique. Dans les explications physiques, ils ne jouent aucun rôle particulier.

> « Ἀγαθον καὶ ξαξόν · ἔν καὶ ταὐτό*. »
>
> Héraclite

> « Wenn ein Arzt hinter dem Sarg seines Patienten geht, so folgt manchmal tatsächlich die Ursache der Wirkung**. »
>
> Robert Koch

La conscience est-elle nécessaire ?

> « Variatio delectat***. »
>
> Cicéron

Réf. 206

Un grand nombre de discussions stériles s'étalent sur ce sujet, et nous sauterons, ici, par-dessus celles-ci. Qu'est-ce que la conscience ? Le plus simplement et concrètement du monde, la conscience signifie la possession d'une petite partie de soi-même qui surveille ce que le reste de soi-même perçoit, ressent, pense et fait. En bref, la conscience est l'aptitude à s'observer soi-même, et en particulier les mécanismes et motivations intimes du soi. La *conscience* représente la capacité à mener une introspection. Pour cette raison, celle-ci *ne* constitue *pas* une condition préalable à l'étude du mouvement. En réalité, les animaux, les plantes ou les machines sont aussi capables d'observer le mouvement. Pour le même motif, la conscience n'est pas nécessaire pour observer le mouvement en mécanique quantique. D'un autre côté, l'étude du mouvement et celle de soi-même possèdent toutes les deux beaucoup de choses en commun : le besoin d'observer attentivement, de surmonter les présomptions, de dominer la crainte et le plaisir de le faire.

Jusqu'ici, nous avons assez insisté sur la précision des concepts. Discuter du mouvement représente également quelque chose qui doit être profondément apprécié. Voyons pourquoi.

> « La précision et la clarté vérifient la relation d'indétermination : leur produit est constant. »

Curiosité

> « La précision est fille de la curiosité. »

Comme dans la vie de chaque individu, l'histoire de l'humanité retrace une lutte permanente pour éviter les pièges de l'acceptation des déclarations énoncées comme vraies par des autorités, sans vérifier les faits. En réalité, chaque fois que la curiosité nous conduit à formuler une question, il y a toujours deux manières générales de procéder.

---

* « Bien et mal sont tout un. »

** « Quand un médecin marche derrière le cercueil de son patient, en réalité la cause suit parfois l'effet. »

*** « La variété séduit. » Marcus Tullius Cicero (106–43 av. J.-C.) fut un important juriste, orateur et homme politique de la fin de l'Empire romain.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'une consiste à contrôler personnellement les faits, l'autre consiste à interroger quelqu'un. Néanmoins, la dernière technique est dangereuse : elle implique d'abandonner une partie de soi-même. Les gens en bonne santé, les enfants dont la curiosité est toujours vivante, ainsi que les scientifiques, choisissent la première méthode. Après tout, la science est de la curiosité adulte.

La curiosité, également appelée *moteur exploratoire*, joue à des jeux étranges avec les gens. En commençant avec l'expérience originale du monde comme étant une grande « soupe » de parties en interaction, la curiosité peut nous inciter à découvrir *toutes* les parties et *toutes* les interactions. Elle n'entraîne pas seulement les individus. Nous avons observé que, lorsque des rats exhibent un comportement de curiosité, certaines cellules cervicales situées dans l'hypothalamus s'activent et secrètent des hormones qui produisent des émotions et des sensations de bien-être. Si un rat a la possibilité, à travers certaines électrodes implantées, d'exciter ces mêmes cellules en appuyant sur un interrupteur, il le fait volontairement : les rats deviennent *dépendants* des sensations reliées à la curiosité. Comme les rats, les êtres humains sont curieux parce qu'ils aiment cela. Ils exercent leur curiosité pour au moins quatre raisons : parce qu'ils sont artistes, parce qu'ils sont amateurs de plaisir, parce qu'ils sont aventuriers, et parce qu'ils sont rêveurs. Voyons comment.

Réf. 207

À l'origine, la curiosité provient de la volonté d'interagir d'une manière positive avec l'environnement. Les jeunes enfants en fournissent d'excellents exemples : la curiosité est un ingrédient naturel de leur vie, de la même manière qu'elle l'est pour d'autres mammifères et quelques espèces d'oiseaux. Par ailleurs, on trouve la même distribution taxonomique pour le comportement joueur. En bref, tous les animaux qui jouent sont curieux, et vice versa. La curiosité fournit les bases de l'apprentissage, de la créativité et donc de toutes les activités humaines qui laissent un héritage, telles que l'art ou la science. L'artiste et théoricien de l'art Joseph Beuys (1920–1986) avait son propre principe conducteur, qui stipule que *chaque* acte de création est une forme d'art. Les êtres humains, et particulièrement les enfants, jouissent de la curiosité parce qu'ils ressentent son importance pour la créativité, et pour le développement en général.

Réf. 208

La curiosité nous conduit régulièrement à nous exclamer : « Oh ! », une expérience qui conduit à la seconde raison d'être curieux : la délectation des sensations d'émerveillement et d'étonnement. Épicure (Epikuros) (341–271 av. J.-C.) soutenait que cette expérience, θαυμάζειν, représente l'origine de la philosophie. Ces sensations, qui sont de nos jours diversement qualifiées de religieuse, spirituelle, numineuse, etc., sont les mêmes que celles qui font que les rats peuvent devenir dépendants. Parmi ces sensations, Rudolf Otto a introduit la distinction dorénavant classique entre le fascinant et l'effrayant. Il nomma les expériences correspondantes « mysterium fascinans » et « mysterium tremendum »*. Dans le cadre de ces distinctions, les physiciens, les scientifiques, les enfants et les initiés prennent une position nette : ils choisissent le *fascinans* comme point de départ de leur motivation et pour leur approche du monde. De telles émotions de fascination amènent certains enfants qui contemplent le ciel nocturne à rêver de devenir astronomes, certains qui observent à travers un microscope de devenir biologistes

* Cette distinction est le fondement de Rudolf Otto, *Das Heilige – Über das Irrationale in der Idee des Göttlichen und sein Verhältnis zum Rationalen*, Beck, München, 1991. C'est une nouvelle édition de l'œuvre qui marqua son époque, à l'origine publiée au début du vingtième siècle. Rudolf Otto (1869–1937) fut l'un des plus importants théologiens de son temps.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ou physiciens, et ainsi de suite. (Il se pourrait aussi que la génétique ait son mot à dire dans cette aspiration à la recherche de nouveauté.) Réf. 209

Les moments les plus exaltants dans l'étude de la physique sont probablement ceux qui surviennent après que des nouvelles observations ont ébranlé les conceptions habituelles que nous avions auparavant, après qu'elles nous ont imposé d'abandonner une conviction préalablement tenace et qu'elles ont suscité le sentiment d'avoir échoué. C'est alors que, dans ce moment critique, nous découvrons finalement une description plus appropriée et plus précise de ces observations, qui apporte un meilleur éclairage du monde, nous sommes envahis d'une sensation généralement appelée illumination. Toute personne qui a gardé la mémoire et le goût intacts de ces instants magiques sait que dans ces situations nous sommes pénétrés par un sentiment de symbiose entre soi-même et le monde*. La jouissance de ces moments, les aventures de la modification structurelle de la pensée qui leur sont associées, et l'exaltation des perspectives qui en découlent constituent la motivation de nombreux scientifiques. Leur dénominateur commun est : peu de discours et beaucoup de plaisir. Dans cet esprit, le célèbre physicien autrichien Victor Weisskopf (1908–2002) aimait dire en plaisantant : « Il y a deux choses qui font que la vie vaut la peine d'être vécue : Mozart et la mécanique quantique. »

Le choix de quitter le *tremendum* pour aller vers le *fascinans* est issu d'un désir inné, plus évident chez les enfants, de diminuer l'incertitude et la peur. Ce moteur est le père de toutes les aventures. Il possède un célèbre parallèle dans la Grèce antique, où les premiers hommes qui étudièrent les observations, tels qu'Épicure, déclarèrent explicitement que leur objectif était de libérer les gens des craintes inutiles en approfondissant la connaissance et en métamorphosant les victimes passives apeurées en êtres fascinés, actifs et responsables. Ces anciens penseurs commencèrent à populariser l'idée que, comme tous les événements courants dans notre vie, les événements plus rares découlent également de règles. Par exemple, Épicure souligna que l'éclair est un phénomène naturel provoqué par des interactions entre les nuages, et insista sur le fait qu'il était un processus naturel, c'est-à-dire un processus qui obéit à des règles, de la même manière que la chute d'une pierre ou tout autre processus familier de la vie quotidienne.

En enquêtant sur les phénomènes qui les entourent, les philosophes et plus tard les scientifiques réussirent à libérer les gens de la plupart des peurs provoquées par l'incertitude et par un manque de connaissance concernant la nature. Cette émancipation joua un rôle important dans l'histoire de la culture humaine, et s'immisce encore dans l'histoire personnelle de nombreux scientifiques. Le but de parvenir à des vérités stables et ultimes a inspiré (mais également entravé) un grand nombre d'entre eux. Albert Einstein est d'une exemplarité reconnue pour cela, pour avoir découvert la relativité, pour avoir lancé et ensuite dénigré la mécanique quantique.

De manière intéressante, dans l'expérience et dans le développement de chaque être humain, la curiosité, et par conséquent le goût pour les sciences, apparaît *avant* la magie et la superstition. La magie exige de la tromperie pour être efficace, et la superstition a besoin d'endoctrinement ; la curiosité n'a besoin ni de l'un ni de l'autre. Les conflits de

* Plusieurs chercheurs ont étudié plus en détail les situations conduisant à ces instants privilégiés, notamment le médecin et physicien prussien Hermann von Helmholtz (1821–1894) et le mathématicien français Henri Poincaré (1854–1912). Ils distinguaient quatre phases dans la conception d'une idée à la base d'un tel instant magique : la saturation, l'incubation, l'illumination et la vérification. Réf. 210

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

la curiosité avec les superstitions, les idéologies, les autorités ou le reste de la société sont donc programmés à l'avance.

La curiosité est l'exploration des limites. Pour chaque limite, il existe deux possibilités : cette limite peut se révéler être réelle ou apparente. Si la limite est réelle, l'attitude la plus opportune est celle de l'acceptation. Le fait de s'approcher de la limite donne alors de la force. Si la limite n'est qu'apparente et en réalité inexistante, l'attitude la plus profitable consiste à réévaluer ce point de vue erroné, à en extraire le rôle positif qu'il joue, puis à dépasser cette limite. La distinction entre les limites réelle et apparente est possible uniquement lorsque cette limite est examinée avec beaucoup de soin, d'ouverture d'esprit et sans aucun préjugé. Par-dessus tout, l'exploration des limites nécessite du courage.

> « Das gelüftete Geheimnis rächt sich*. »
>
> Bert Hellinger

Courage

> « Il est dangereux d'avoir raison dans des choses où des hommes accrédités ont tort. »
>
> Voltaire

> « Manche suchen Sicherheit, wo Mut gefragt ist, und suchen Freiheit, wo das Richtige keine Wahl läßt**. »
>
> Bert Hellinger

Réf. 211

La plus grande partie de la teneur de ce chapitre est nécessaire dans l'aventure pour atteindre le sommet de la Montagne Mouvement. Mais il en faut plus encore. Comme toute entreprise, la curiosité exige également du courage, et la curiosité absolue, comme nous la recherchons dans notre expédition, requiert un courage entier. En fait, il est facile d'être découragé dans ce voyage. Cette excursion est souvent abandonnée par d'autres personnes car inutile, inintéressante, puérile, embarrassante, compromettante ou, plus fréquemment, malfaisante. Par exemple, entre le décès de Socrate en 399 av. J.-C. et celui de Paul-Henri Thiry, baron d'Holbach, au dix-huitième siècle, aucun livre ne fut publié avec l'affirmation « les dieux n'existent pas », à cause des menaces que quiconque aurait subies dans sa vie pour avoir osé la proférer. Même aujourd'hui, ce type d'attitude est toujours courant, comme l'indiquent les journaux.

Par le biais de l'élimination constante de l'incertitude, la curiosité et l'activité scientifique sont toutes les deux intrinsèquement opposées à toute idée, personne ou organisation qui tenterait d'esquiver la confrontation des affirmations avec les observations. Ces « fugueurs » demandent à vivre avec des superstitions et des croyances. Mais les superstitions et les croyances engendrent des craintes inutiles. Et la peur représente le fondement de tous les régimes autoritaires. Nous obtenons un cercle vicieux : le rejet de la comparaison avec l'observation produit la peur – la peur permet de maintenir en place l'autorité injuste – cette dernière empêche la confrontation avec l'observation – etc.

* « Le secret dévoilé prend sa revanche. »

** « Certains cherchent la sécurité là où le courage est nécessaire et cherchent la liberté là où la véritable voie ne laisse aucun choix. » Cela est tiré du magnifique livret de Bert Hellinger, *Verdichtetes*, Carl-Auer Systeme Verlag, 1996.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Par conséquent, la curiosité et la science sont fondamentalement opposées aux autorités injustes, une relation qui rendit la vie dure à des personnages comme Anaxagore (500–428 AV. J.-C.) dans la Grèce antique, Hypatie d'Alexandrie dans l'Empire romain chrétien, Galileo Galilei dans l'État de l'Église, Antoine Lavoisier en France, et Albert Einstein (et beaucoup d'autres) en Allemagne. Dans la seconde moitié du vingtième siècle, les victimes furent Robert Oppenheimer, Melba Phillips et Chandler Davis aux États-Unis, et Andrei Sakharov dans l'Union soviétique. Chacun d'eux raconte une histoire terrible mais instructive, comme en témoignent, plus récemment, Fang Lizhi, Xu Liangying, Liu Gang et Wang Juntao en Chine, Kim Song-Man en Corée du Sud, Otanazar Aripov en Ouzbékistan, Ramadan al-Hadi al-Hush en Libye, Bo Bo Htun en Birmanie, Sami Kilani et Salman Salman en Palestine, ainsi que plusieurs centaines d'autres. Dans un grand nombre de sociétés autoritaires, l'antagonisme entre la curiosité et l'injustice a entravé voire entièrement réprimé le développement de la physique et des autres sciences, avec des conséquences économiques, sociales et culturelles extrêmement négatives.

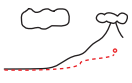
Lorsque nous nous sommes lancés dans cette ascension, nous avions besoin d'être conscients de ce que nous faisions. En réalité, les obstacles externes peuvent être esquivés ou du moins largement rabaissés en gardant solidement ce projet en soi. D'autres difficultés demeurent toujours, cette fois de nature personnelle. Nombreux sont ceux qui ont tenté d'embarquer dans cette aventure avec une certaine intention dissimulée ou explicite, généralement de nature idéologique, et qui se sont trouvés empêtrés par celle-ci avant d'être parvenus à la fin. Certains n'ont pas été préparés à accepter l'humilité requise pour une telle tâche. D'autres n'étaient pas préparés à l'ouverture d'esprit nécessaire, laquelle peut fracasser les convictions les plus profondément tenaces. D'autres encore n'étaient pas prêts à se tourner vers l'imprécis, l'obscur et l'inconnu, qui les taraudent sans cesse.

D'un autre côté, les périls valent le coup d'être affrontés. En considérant la curiosité comme un précepte, en faisant face à la méconnaissance et à la peur avec tout notre courage, nous nous libérons de toutes les croyances. En échange, vous parvenez alors à savourer les plaisirs les plus intenses et la satisfaction la plus profonde que la vie puisse vous offrir.

Nous persévérons donc dans notre excursion. À ce niveau, la piste en direction du sommet de la Montagne Mouvement est en train de nous conduire vers la prochaine aventure : la découverte de l'origine des dimensions et des formes dans la nature.

> « Et les dieux dirent à l'homme : « Prenez ce que vous voulez, et payez-en le prix. »
>
> (Dicton populaire)

> « Il est difficile de rendre un homme misérable s'il s'estime être digne.
>
> Abraham Lincoln



La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Annexe A

UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES

Mesurer consiste à comparer avec un étalon. Un étalon est basé sur une *unité*. Une multitude de systèmes d'unités différents ont été utilisés à travers le monde. La plupart des étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Une telle autorité peut être utilisée abusivement : c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même jadis. La solution est identique dans les deux situations : mettre sur pied un étalon indépendant et général. Au sujet des unités, cela eut lieu au dix-huitième siècle : pour éviter des abus de la part d'institutions autoritaires, pour évincer les problèmes dus aux unités de référence différentes, variables et non reproductibles, et – ce n'est pas une blague – pour simplifier le recouvrement des impôts, un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. On l'appelle le *Système International d'Unités*, *SI* en abrégé, et il est défini par un traité international, la « Convention du Mètre ». Les unités sont régies par un organisme international, la « Conférence Générale des Poids et Mesures », et ses organisations filles, la « Commission Internationale des Poids et Mesures » et le « Bureau International des Poids et Mesures » (BIPM), qui ont toutes vu le jour au même moment, juste avant la Révolution française.

Réf. 212

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*, dont les définitions officielles sont données ci-dessous, avec les dates de leurs formulations :

- « La *seconde* est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 kelvin. » (1967)*
- « Le *mètre* est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde. » (1983)
- « Le *kilogramme* est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. » (1901)*
- « L'*ampère* est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. » (1948)
- « Le *kelvin*, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. » (1967)*
- « La *mole* est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. » (1971)*
- « La *candela* est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. » (1979)*

Notez que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un modèle de référence du mouvement, à savoir la lumière. C'est une illustration supplémentaire qui souligne le fait que l'observation du mouvement, qui est le type fondamental de changement, est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. Par ailleurs, l'emploi de la lumière dans les définitions avait déjà été proposé en 1827 par Jacques Babinet*.

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités sont définies par multiplication et division. Ainsi, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes :

- Les unités du SI forment un système ayant *la précision de l'état de l'art* : toutes les unités sont définies avec une précision qui est supérieure à la précision des mesures couramment effectuées. De plus, la précision de ces définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle dans la définition de la seconde se situe autour de 10^{-14}, 10^{-10} environ pour le mètre, 10^{-9} environ pour le kilogramme, 10^{-7} pour l'ampère, moins de 10^{-6} pour la mole, 10^{-6} pour le kelvin et 10^{-3} pour la candela.
- Les unités du SI forment un système *absolu* : toutes les unités sont définies de telle manière qu'elles puissent être reproduites dans tout laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une précision élevée. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui détermine les étalons. (Le kilogramme, toujours défini à l'aide d'un artéfact, est la dernière exception à cette exigence, une recherche intensive est en cours pour éliminer cet objet de la définition – une compétition internationale qui prendra encore quelques années. Il existe deux approches : dénombrer des particules ou fixer $\hbar$. La première peut être accomplie dans des cristaux, la dernière en utilisant n'importe quelle formule où $\hbar$ apparaît, comme la formule de la longueur d'onde de de Broglie ou celle de l'effet Josephson.)
- Les unités du SI forment un système *pratique* : les unités de base sont des quantités dont la grandeur est familière. Les unités couramment employées possèdent des dénominations et des abréviations standard. La liste complète inclut les sept unités de base, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Les unités *supplémentaires* du SI sont les deux suivantes : l'unité de l'angle (plan), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon, est le *radian* (rad). Pour l'angle solide, défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon, l'unité est le *stéradian* (sr).

Les unités *dérivées* ayant un nom spécial, dans leur désignation officielle en français, c'est-à-dire sans lettre capitale et sans accent, sont :

* Les symboles respectifs sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Le prototype international du kilogramme est un cylindre en platine–iridium conservé au BIPM à Sèvres, en France. Pour obtenir plus de précisions sur les niveaux de l'atome de césium, consultez un livre sur la physique atomique. L'échelle Celsius d'une température θ est définie ainsi : $\theta/°C = T/K - 273,15$, remarquez le minuscule écart avec le nombre apparaissant dans la définition du kelvin. Le SI stipule également : « Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules ». Dans la définition de la mole, nous sous-entendons que les atomes du carbone 12 sont non liés, au repos et dans leur état fondamental. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555,5 nm, c'est-à-dire la couleur verte, qui est à peu près égale à la longueur d'onde où l'œil est le plus sensible.

Réf. 213

* Jacques Babinet (1794–1874) fut un physicien français qui publia des travaux importants en optique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Nom	Symbole
hertz	$Hz = 1/s$
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/m\,s^2$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$
volt	$V = kg\,m^2/As^3$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/A^2s^3$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/As^2$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/A^2s^2$
lumen	$lm = cd\,sr$
becquerel	$Bq = 1/s$
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$

Nom	Symbole
newton	$N = kg\,m/s^2$
joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
coulomb	$C = As$
farad	$F = As/V = A^2s^4/kg\,m^2$
siemens	$S = 1/\Omega$
tesla	$T = Wb/m^2 = kg/As^2 = kg/Cs$
degré Celsius	°C (cf. définition du kelvin)
lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
katal	$kat = mol/s$

Nous remarquons que dans toutes les définitions de ces unités, le kilogramme n'apparaît qu'aux puissances 1, 0 et -1. L'explication finale de cette réalité n'est apparue que récemment. Pouvez-vous tenter d'en formuler la raison ?

Défi 266 pe

Les unités *admises* non SI sont la *minute*, l'*heure*, le *jour* (pour le temps), le *degré* $1° = \pi/180$ rad, la *minute* $1' = \pi/10\,800$ rad, la *seconde* $1'' = \pi/648\,000$ rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. On doit éviter toutes les autres unités.

On rend plus pratiques toutes les unités du SI grâce à l'introduction de désignations et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que nous appelons les *préfixes** :

10^n	Nom	Symb.	10^n	Nom	Symb.
10^1	déca	da	10^{-1}	déci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	péta	P	10^{-15}	femto	f

10^n	Nom	Symb.	10^n	Nom	Symb.
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
non officiel :			Réf. 214		
10^{27}	xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{30}	wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{33}	vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
10^{36}	udekta	U	10^{-36}	udeko	u

* Certains de ces noms sont inventés (yocto qui se prononce de manière presque identique au latin *octo* « huit », zepto qui se prononce presque comme le mot latin *septem*, yotta et zetta qui leur ressemblent, exa et péta qui se prononcent comme les mots grecs ἑξάκις et πεντάκις pour « six fois » et « cinq fois », ceux qui ne sont pas officiels se prononcent comme les mots grecs désignant neuf, dix, onze et douze). Certains sont issus du danois/norvégien (atto pour *atten* « dix-huit », femto pour *femten* « quinze »), certains proviennent du latin (de *mille*, de *centum* « cent », de *decem* « dix », de *nanus* « nain »), certains sont tirés de l'italien (de *piccolo* « petit »), certains sont grecs (micro provient de μικρός « petit », déca/déka de δέκα « dix », hecto de ἑκατόν « cent », kilo de χίλιοι « mille », méga de μέγας « grand », giga de γίγας « géant », téra de τέρας « monstre »).

Interprétez : J'étais bloqué dans un tel embouteillage que j'ai mis un microsiècle pour faire un picoparsec et que ma consommation de carburant fut de deux dixièmes d'un millimètre carré.

Défi 267 e

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

- Les unités du SI forment un système *exhaustif* : elles recouvrent de manière systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles fixent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.
- Les unités du SI forment un système *universel* : elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, dans l'industrie, dans le commerce, à la maison, dans l'enseignement et dans la recherche. Elles pourraient même être employées par des civilisations extraterrestres, si celles-ci existaient.
- Les unités du SI forment un système *cohérent* : le produit ou le quotient de deux unités du SI est aussi une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, « SI » par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne constituent pas l'unique ensemble possible qui puisse vérifier toutes ces conditions, mais elles sont le seul système existant qui le fait*.

Rappelez-vous que puisque chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, toute mesure exige de la matière pour réaliser l'étalon (oui, même pour la vitesse standard), et du rayonnement pour accomplir cette comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils peuvent être clairement dissociés l'un de l'autre.

Page ??

Unités naturelles de Planck

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens emploient souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations sous une forme simple. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont reliées. En physique microscopique, le système des *unités naturelles de Planck* est souvent utilisé. Il est défini en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont donc définies à partir de combinaisons de constantes fondamentales, celles qui correspondent aux unités de base du SI sont données dans le Tableau 39**. Ce tableau est également utile pour convertir des équations notées en unités naturelles aux unités du SI : substituez simplement chaque quantité X par X/X_{Pl}.

Défi 268 e

* La plupart des unités non SI qui sont toujours d'usage dans le monde sont d'origine romaine. Le mile provient de *milia passum*, qui était équivalent à mille (doubles) enjambées d'environ 1 480 mm chacune. Aujourd'hui un mile nautique, autrefois défini comme une minute d'arc à la surface de la Terre, vaut exactement 1 852 m. Le pouce vient de *uncia*/*onzia* (un douzième – d'un pied actuel). La livre (de l'anglais « pound » qui vient de *pondere* « peser ») est employée comme une traduction de *libra* – balance – qui est à l'origine de son abréviation lb. Même la coutume de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Celles-ci et les autres unités toutes aussi cocasses – comme le système dans lequel toutes les unités commencent avec un « f », et qui utilise le furlong/quinze jours comme unité de vitesse – sont dorénavant officiellement définies comme des multiples des unités du SI.

** Les unités naturelles x_{Pl} données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c'est-à-dire celles définies en utilisant la constante $\hbar$, et non, comme le fit à l'origine Planck, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités électromagnétiques peuvent aussi être définies à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\varepsilon_0$ dans les expressions : par exemple, en utilisant $4\pi\varepsilon_0\alpha$, avec la *constante de structure fine* α, on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour des explications sur les nombres situés entre parenthèses, les écarts types, lisez la page 286.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 23 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

NOM	DÉFINITION			VALEUR		
Unités de base						
Longueur de Planck	l_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1{,}616\,0(12)\cdot 10^{-35}$	m
Durée de Planck	t_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^5}$	=	$5{,}390\,6(40)\cdot 10^{-44}$	s
Masse de Planck	m_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c/G}$	=	$21{,}767(16)$	µg
Courant de Planck	I_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	=	$3{,}479\,3(22)\cdot 10^{25}$	A
Température de Planck	T_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	=	$1{,}417\,1(91)\cdot 10^{32}$	K
Unités triviales						
Vitesse de Planck	v_{Pl}	=	c	=	0,3	Gm/s
Moment cinétique de Planck	L_{Pl}	=	$\hbar$	=	$1{,}1\cdot 10^{-34}$	Js
Quantum d'action de Planck	S_{aPl}	=	$\hbar$	=	$1{,}1\cdot 10^{-34}$	Js
Entropie de Planck	S_{ePl}	=	k	=	13,8	yJ/K
Unités dérivées						
Densité de Planck	ρ_{Pl}	=	$c^5/G^2\hbar$	=	$5{,}2\cdot 10^{96}$	kg/m^3
Énergie de Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/G}$	=	$2{,}0$ GJ = $1{,}2\cdot 10^{28}$	eV
Quantité de mouvement de Planck	p_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^3/G}$	=	6,5	Ns
Puissance de Planck	P_{Pl}	=	c^5/G	=	$3{,}6\cdot 10^{52}$	W
Force de Planck	F_{Pl}	=	c^4/G	=	$1{,}2\cdot 10^{44}$	N
Pression de Planck	p_{Pl}	=	$c^7/G\hbar$	=	$4{,}6\cdot 10^{113}$	Pa
Accélération de Planck	a_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/\hbar G}$	=	$5{,}6\cdot 10^{51}$	m/s^2
Fréquence de Planck	f_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/\hbar G}$	=	$1{,}9\cdot 10^{43}$	Hz
Charge électrique de Planck	q_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	=	1,9 aC = 11,7	e
Tension de Planck	U_{Pl}	=	$\sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	=	$1{,}0\cdot 10^{27}$	V
Résistance de Planck	R_{Pl}	=	$1/4\pi\varepsilon_0 c$	=	30,0	Ω
Capacité électrique de Planck	C_{Pl}	=	$4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1{,}8\cdot 10^{-45}$	F
Inductance de Planck	L_{Pl}	=	$(1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	=	$1{,}6\cdot 10^{-42}$	H
Champ électrique de Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	=	$6{,}5\cdot 10^{61}$	V/m
Densité du flux magnétique de Planck	B_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	=	$2{,}2\cdot 10^{53}$	T

Les unités naturelles sont importantes à un autre égard : à chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée d'« infiniment petite (ou grande) », l'expression correcte à considérer est « aussi petite (ou aussi grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante ». Comme on l'explique tout au long de ce texte, et particulièrement dans la Page ?? partie finale, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrémale pour l'observable correspondante – certaines une borne supérieure et d'autres une

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

limite inférieure. Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement déterminés. La valeur extrémale exacte pour chaque observable dans la nature est obtenue lorsque G est remplacé par $4G$, $\hbar$ par $\hbar/2$, k par $k/2$ et $4\pi\varepsilon_0$ par $8\pi\varepsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrémales, ou *unités de Planck corrigées*, sont les *véritables unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrémales, mais uniquement pour certaines quantités étendues. (Pouvez-vous deviner lesquelles ?)

Défi 269 s

Autres systèmes d'unités

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est l'évaluation des intensités de toutes les interactions. Par conséquent il n'est pas pratique de fixer la constante de la gravitation G à un, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies fixent souvent $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$*, laissant seulement la constante gravitationnelle G dans les équations.

Dans ce système, il n'y a qu'une seule unité fondamentale, mais son choix reste libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité de base, longueur qui est l'archétype d'une quantité mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont alors reliées par

$$\begin{array}{rl} 1/[l^2] = [E]^2 &= [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}]\,, \\ 1/[l] = [E] &= [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T]\,, \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha]\,, \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{array} \tag{86}$$

où nous avons noté $[x]$ l'unité de la quantité x. Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système**.

Souvent, afin d'avoir un aperçu des énergies nécessaires pour observer un effet en cours d'étude, on choisit une énergie de référence comme unité fondamentale. En physique des particules l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* (eV), défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une

* Des définitions différentes pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entres autres, au système d'unités gaussiennes souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités de Heaviside–Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

Réf. 215

** Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique et B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance, P la puissance, G la constante de la gravitation.

La page Web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités l'une vers l'autre.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_S = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer des masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la *même* dimension, et $\hbar$ possède la dimension d'une surface.

Réf. 216

Déjà au dix-neuvième siècle, George Stoney avait suggéré d'utiliser comme unités de longueur, de temps et de masse les quantités $l_S = \sqrt{Ge^2/(c^4 4\pi\varepsilon_0)} = 1{,}4 \cdot 10^{-36}$ m, $t_S = \sqrt{Ge^2/(c^6 4\pi\varepsilon_0)} = 4{,}6 \cdot 10^{-45}$ s et $m_S = \sqrt{e^2/(G4\pi\varepsilon_0)} = 1{,}9$ µg. Comment ces unités sont-elles reliées aux unités de Planck ?

Défi 270 s

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

différence de potentiel électrique de 1 volt (« protonvolt » serait une désignation plus appropriée). Ainsi nous avons $1\,\mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$, ou approximativement

$$1\,\mathrm{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\mathrm{aJ} \tag{87}$$

ce qui est facile à mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ donne $G = 6{,}9 \cdot 10^{-57}\,\mathrm{eV}^{-2}$ et nous permet aussi d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la distance, à l'aide des correspondances respectives
Défi 271 e $1\,\mathrm{eV} \equiv 1{,}8 \cdot 10^{-36}\,\mathrm{kg} \equiv 5{,}4 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{Ns} \equiv 242\,\mathrm{THz} \equiv 11{,}6\,\mathrm{kK}$ et $1\,\mathrm{eV}^{-1} \equiv 4{,}1\,\mathrm{fs} \equiv 1{,}2\,\mu\mathrm{m}$.

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations qui suivent sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20 °C ou 293 K, correspond à une énergie cinétique par particule de 0,025 eV ou 4,0 zJ. L'énergie la plus élevée d'une particule, mesurée jusqu'à présent, appartient à un rayon cosmique d'une énergie de
Réf. 217 $3 \cdot 10^{20}$ eV ou 48 J. Ici bas, sur la Terre, nous avons construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des anti-électrons, et un autre capable de produire une énergie de 10 TeV ou 1,6 µJ pour des protons sera bientôt achevé. Ils appartiennent tous les deux au CERN à Genève et possèdent une circonférence de 27 km.

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK, dans un système
Réf. 218 de noyaux de rhodium maintenus par un procédé de refroidissement particulier. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est également la plus petite jamais mesurée : elle correspond à 24 feV ou $3{,}8\,\mathrm{vJ} = 3{,}8 \cdot 10^{-33}\,\mathrm{J}$. Pour des particules isolées, le record semble être celui de neutrons : des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm.

Curiosités et défis amusants sur les unités

Le fait de ne pas utiliser les unités du SI peut coûter cher. En 1999, la NASA a perdu un satellite sur Mars parce que certains programmeurs de logiciels avaient utilisé des unités impériales* à la place des unités du SI dans des lignes de code. En conséquence, Mars Climate Orbiter s'écrasa sur la planète, au lieu de graviter autour de celle-ci. La perte fut évaluée à 100 millions d'euros environ**.

* *

Le *gray* est la quantité de radioactivité qui dépose 1 J sur 1 kg de matière. Le *sievert* est l'unité de radioactivité adaptée aux êtres humains en pondérant chaque type de tissu humain à l'aide d'un facteur représentatif de l'impact que le rayonnement dépose sur celui-ci. Quatre à cinq sieverts constituent une dose létale pour les êtres humains. En comparaison, la radioactivité naturelle présente à l'intérieur du corps humain conduit à une dose de 0,2 mSv par an. Une radiographie moyenne aux rayons X engendre une
Réf. 219 radiation de 1 mSv, un scanner, 8 mSv.

* Des unités de mesure anglo-saxonnes. [N.D.T.]

** Ce récit ranima une vieille (et fausse) rumeur qui affirme que seuls trois pays dans le monde n'utilisent pas les unités du SI : le Libéria, les États-Unis et la Birmanie.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 24 Quelques valeurs mesurées de puissances visibles (intensités lumineuses).

OBSERVATION	INTENSITÉ LUMINEUSE
Flamme de bougie	1 cd
Lampe de poche	2 cd
Feux de position d'une voiture	10 cd
Plein phare d'une voiture (avec réflecteur, centre du faisceau)	60 cd
Lampe de cinéma	1,5 kcd
Flash photographique	1 Mcd
Phare	2 Mcd
Les plus gros projecteurs	80 Mcd

* *

Vous êtes décontenancés par la candela ? La définition dit simplement que 683 cd = 683 lm/sr correspond à 1 W/sr. La candela est donc une unité de la puissance lumineuse par angle (solide), ou d'*intensité lumineuse*, mis à part qu'elle est corrigée pour s'ajuster à la sensibilité de l'œil : la candela mesure simplement la puissance *visible* par unité d'angle.

De manière similaire, 683 lm = 683 cd sr correspond à 1 W. Donc le lumen et le watt mesurent tous les deux de la puissance, ou du flux d'énergie, mais le lumen mesure uniquement la partie *visible* de la puissance ou flux énergétique. Cette différence est exprimée en insérant les qualificatifs « radiant » ou « lumineux » : ainsi, le watt mesure le flux *radiant*, tandis que le lumen mesure le flux *lumineux*.

Le facteur 683 est d'origine historique. Une chandelle ordinaire émet une intensité lumineuse d'environ une candela. Par conséquent, la nuit, une chandelle peut être vue
Défi 272 e jusqu'à une distance de 10 ou 20 kilomètres. Une ampoule à incandescence de 100 W produit 1 700 lm, et les diodes émettrices de lumière les plus brillantes environ 5 lm. Les projecteurs de cinéma produisent environ 2 Mlm, et les flashs les plus intenses, comme l'éclair, 100 Mlm.

L'*éclairement énergétique* de la lumière du soleil est d'environ 1 300 W/m^2 lors d'une journée ensoleillée. Par ailleurs, l'*éclairement lumineux* n'est que de 120 klm/m^2 = 120 klux ou 170 W/m^2. (Une journée d'été recouverte de nuages ou une journée d'hiver dégagée produit environ 10 klux. L'éclairement lumineux est principalement ce que nous appelons la « luminosité » dans la vie courante.) Ces nombres indiquent que la plupart de l'énergie du Soleil qui parvient à la Terre se situe en dehors du spectre visible.

Sur un glacier, près de la côte, sur le sommet d'une montagne, ou lors de conditions météorologiques particulières, la luminosité peut atteindre 150 klux. Les lampes les plus brillantes, celles utilisées pendant les opérations chirurgicales, produisent 120 klux. Les hommes ont besoin d'environ 30 lux pour une lecture confortable. Les musées sont souvent maintenus dans l'obscurité parce que les peintures à l'eau sont dégradées par la lumière au-delà de 100 lux, et les peintures à l'huile au dessus de 200 lux. La pleine lune
Réf. 220 produit 0,1 lux, et le ciel lors d'une nuit sombre sans lune, environ 1 mlux. Les yeux conservent leur aptitude à distinguer les couleurs quelque part entre 0,1 lux et 0,01 lux,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

TABLEAU 25 Quelques valeurs mesurées d'éclairements lumineux.

OBSERVATION	ÉCLAIREMENT LUMINEUX
Pâle étoile	0,1 nlx
Sirius	10 µlx
Le phot (ancienne unité d'éclairement lumineux)	10 µlx
Jupiter	20 µlx
Pleine Lune	0,01 à 0,24 lx
La rue la nuit, faible trafic, faible éclairage	0,1 à 3 lx
La rue la nuit, fort trafic	10 à 30 lx
Pour la lecture	50 à 100 lx
Écran de cinéma	100 lx
Lieu de travail	0,2 à 5 klx
Journée nuageuse	1 klx
Journée ensoleillée	120 klx
Film dans un projecteur de cinéma	5 Mlx
Douloureux pour l'œil	100 Mlx

l'œil cesse de remplir sa fonction en deçà de 1 nlux. Les dispositifs techniques qui produisent des images dans l'obscurité, telles que les lunettes de vision nocturne, commencent à fonctionner à partir de 1 µlux. Par ailleurs, le corps humain lui-même *brille* à environ 1 plux, une valeur trop faible pour pouvoir être décelée par l'œil, mais facilement mesurable à l'aide d'appareils spécialisés. La source de cette émission reste toujours du domaine de la recherche.

* *

Les plus fortes intensités lumineuses atteignent plus de 10^{18} W/m^2, soit plus de 15 ordres de grandeur au dessus de l'intensité de la lumière du soleil. Elles sont produites par des focalisations très étroites de lasers pulsés. Le champ électrique de ces impulsions lumineuses est du même ordre que le champ situé à l'intérieur des atomes, un tel faisceau ionise par conséquent toute la matière qu'il rencontre. Réf. 221

* *

La *densité lumineuse* est une quantité qui est souvent utilisée par les spécialistes de la lumière. Son unité est 1 cd/m^2, que l'on désigne officieusement 1 Nit et abrégé 1 nt. Les yeux voient, uniquement avec les bâtonnets, de 0,1 µcd/m^2 à 1 mcd/m^2, ils voient avec les cônes simplement au-dessus de 5 cd/m^2, la perception est meilleure entre 100 et 50 000 cd/m^2, et ils deviennent complètement éblouis au-delà de 10 Mcd/m^2 : soit une étendue totale de 15 ordres de grandeur.

* *

La longueur de Planck est approximativement égale à la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à son aise (m = 80 kg, v = 0,5 m/s), ce mouvement Réf. 222

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

est par conséquent appelé à juste titre la « promenade de Planck ».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain, à l'âge de dix jours environ.

* *

La seconde ne correspond plus à 1/86 400ème du jour, bien que ce fût le cas en l'an 1900. La Terre met maintenant environ 86 400,002 s pour effectuer une rotation, de telle sorte que le *Service international de la rotation terrestre* doit régulièrement introduire une seconde intercalaire pour s'assurer que le Soleil est à son plus haut niveau dans le ciel à midi tapante*. Le temps défini de cette manière est appelé *Temps Universel Coordonné*. La vitesse de rotation de la Terre varie également de manière irrégulière d'un jour à l'autre à cause des conditions météorologiques, la vitesse de rotation moyenne fluctue même entre l'hiver et l'été à cause des changements qui surviennent dans les calottes glaciaires polaires, et de surcroît cette moyenne diminue au cours du temps à cause du frottement engendré par les marées. La fréquence d'insertion de ces secondes intercalaires est par conséquent supérieure à une fois tous les 500 jours, et n'est pas constante dans le temps.

* *

Les quantités mesurées de la manière la plus précise dans la nature sont les fréquences de certains pulsars millisecondes**, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites, et la constante de Rydberg de l'*hydrogène atomique*, qui peuvent toutes être mesurées aussi précisément qu'est définie la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur finie de sa raie spectrale, ce qui restreint la précision accessible : cette limite est d'environ 14 chiffres.

* *

L'horloge la plus précise jamais réalisée, en utilisant des micro-ondes, possède une stabi-
Réf. 223 lité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 fut d'environ 10^{-15}, mais des valeurs tournant autour de 10^{-17} semblent
Réf. 224 rester du domaine du technologiquement possible. La précision des horloges est limitée par le bruit pour des brèves durées de mesure, et pour des longues durées de mesure par des biais, c'est-à-dire par des effets systématiques. La région de la plus forte stabilité dépend du type d'horloge utilisée, elle se situe généralement entre 1 ms pour des horloges optiques et 5 000 s pour des masers. Les pulsars sont le seul type d'horloge pour lequel cette région n'est pas encore déterminée, elle se situe vraisemblablement à plus de 20 années, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre leur découverte et l'instant où nous écrivons ces lignes.

* *

* Leur site Web sur hpiers.obspm.fr donne plus de précisions sur les particularités de ces insertions, comme sur maia.usno.navy.mil, l'un des quelques sites Web militaires utiles. Consultez aussi www.bipm.fr, le site du BIPM.

** Un tour d'horizon de ce travail fascinant en est donné par J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* **341**, pp. 117–134, 1992.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Les durées les plus brèves qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules « élémentaires ». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été évaluée à moins de 10^{-23} s. De telles périodes sont mesurées en utilisant une chambre à bulles, dans laquelle la trace est photographiée. Pouvez-vous estimer quelle est la longueur de cette trajectoire ? (C'est une question trompeuse – si votre longueur ne peut pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

Réf. 225
Défi 273 s

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} années, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, soit 10^{32} années. Ces périodes sont donc beaucoup plus grandes que l'âge de l'univers, estimé à quatorze milliards d'années.

Réf. 226

* *

Les constantes fondamentales de la physique mesurées avec le moins de précision sont la constante de la gravitation G et la constante de couplage de l'interaction forte α_s. L'âge de l'univers et sa densité sont déterminés avec encore moins de précision (regardez le Tableau 44).

Page 289

* *

La précision des mesures de masse des solides est limitée par des effets simples tels que l'adsorption de l'eau. Pouvez-vous estimer la masse d'une monocouche d'eau – une couche ayant l'épaisseur d'une seule molécule – sur un métal pesant 1 kg ?

Défi 274 s

* *

Les variations des quantités sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3 000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont dorénavant en train d'être surpassés par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquence de 10^{-21} ont déjà été construits, et ils sont toujours en cours de perfectionnement.

Réf. 227
Réf. 228

* *

L'astronome suédois Anders Celsius (1701–1744) fixa initialement le point de congélation de l'eau à 100 degrés et le point d'ébullition à 0 degré. Cette échelle fut inversée par la suite. Cependant, l'histoire ne se termine pas là. Avec la définition officielle du kelvin et du degré Celsius, à la pression standard de 1 013,25 Pa, l'eau bout à 99,974 °C. Pouvez-vous expliquer pourquoi ce n'est plus 100 °C ?

Réf. 229
Défi 275 s

* *

Au cours du millénaire précédent, on avait coutume de mesurer l'énergie thermique en utilisant la *calorie* comme unité, notée cal. 1 cal est l'énergie nécessaire pour réchauffer 1 g d'eau de 1 K. Pour compliquer les choses, 1 kcal était souvent noté 1 Cal. (Nous parlions également de grande et de petite calorie.) 1 kcal vaut 4,1868 kJ.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

* *

Les unités du SI sont adaptées aux êtres humains : les valeurs du battement de cœur, de la taille humaine, du poids, de la température et de la quantité de substance d'un homme se rapprochent de la valeur unitaire à guère plus d'un couple d'ordres de grandeurs. Les unités du SI confirment donc (approximativement) ce que disait Protagoras il y a 25 siècles : « L'homme est la mesure de toutes choses ».

* *

Certains systèmes d'unités sont particulièrement mal adaptés aux hommes. Le plus infâme d'entre eux est la taille S des chaussures. C'est un nombre pur calculé ainsi :

$$\begin{aligned} S_{\text{France}} &= 1{,}5\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) \\ S_{\text{Europe centrale}} &= 1{,}5748\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) \\ S_{\text{Homme anglo-saxon}} &= 1{,}181\,\text{cm}^{-1}(l + 1 \pm 1\,\text{cm}) - 22 \end{aligned} \tag{88}$$

où l représente la longueur d'un pied et la correction de longueur dépend de l'entreprise de confection. De surcroît, la formule anglo-saxonne n'est pas valable pour les femmes et les enfants, où le premier facteur dépend, pour des raisons marketing, à la fois du fabricant et de la taille elle-même. Le standard ISO exige, de façon non surprenante, d'exprimer la longueur du pied en millimètres.

* *

Le tableau des préfixes du SI recouvre 72 ordres de grandeurs. Combien de préfixes supplémentaires seraient nécessaires ? Même une liste très longue n'incorporera qu'une partie infime de l'étendue infinie des possibilités. La Conférence Générale des Poids et Mesures devra-t-elle se poursuive éternellement, pour définir un nombre infini de préfixes du SI ? Pourquoi ?

Défi 276 s

* *

Le philosophe français Voltaire, après avoir rencontré Newton, publia l'histoire maintenant célèbre qui raconte que la correspondance entre la chute des objets et le mouvement de la Lune fut découverte par Newton lorsqu'il vit une pomme tomber d'un arbre. Plus d'un siècle plus tard, juste avant la Révolution Française, un jury de scientifiques décida de prendre comme unité de la force précisément celle exercée par la gravité sur une *pomme étalon*, et de la baptiser du nom de ce scientifique anglais. Après une étude approfondie, on trouva que la masse de la pomme étalon était de 101,9716 g, son poids fut donc appelé 1 newton. Depuis lors, les visiteurs du musée à Sèvres près de Paris ont eu la possibilité d'admirer le mètre étalon, le kilogramme étalon et la pomme étalon*.

* Pour être franc, c'est une blague : il n'existe aucune pomme étalon. Par contre, ce qui suit n'est *pas* une plaisanterie : des propriétaires de plusieurs pommiers en Grande-Bretagne et aux États-Unis prétendirent descendre, suite à un déracinement, de l'arbre original sous lequel Newton eut sont trait de génie. Des tests ADN ont même été réalisés pour décider s'ils dérivaient tous du même arbre. De façon non surprenante, le résultat a établi que l'arbre situé au MIT, contrairement à ceux de Grande-Bretagne, est un faux.

Réf. 230

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

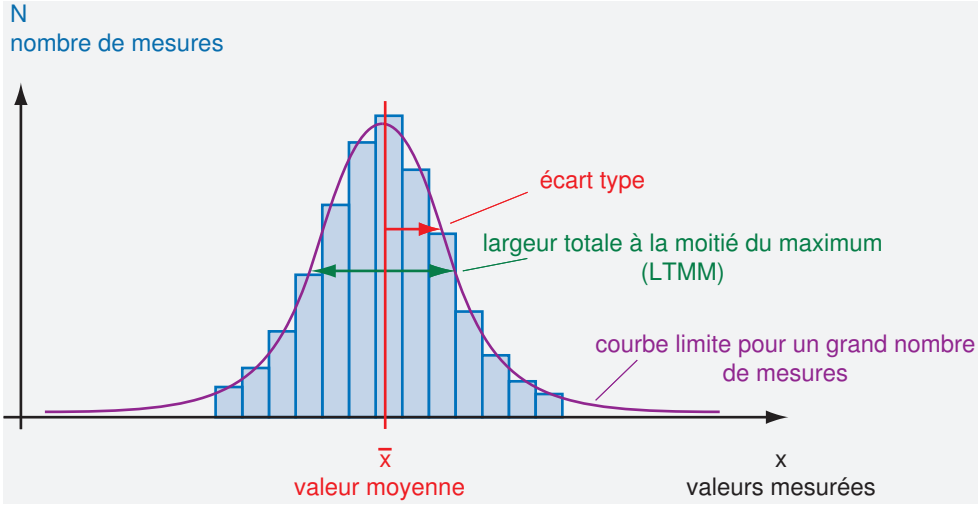


FIGURE 87 Une expérience de précision et sa distribution des mesures.

PRÉCISION ET EXACTITUDE DES MESURES

Comme nous l'avons expliqué à la page 286, la *précision* exprime dans quelle mesure un résultat est bien reproduit lorsque l'évaluation est réitérée, l'*exactitude* est le degré de correspondance d'une mesure à la véritable valeur. Le manque de précision est dû à des *erreurs aléatoires* ou accidentelles, la meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer l'*écart-type*, généralement noté σ, qui est défini par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \,, \tag{89}$$

où $\bar{x}$ représente la moyenne des mesures x_i. (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule au lieu de n ?) Défi 277 s

Pour la plupart des expériences, la distribution des valeurs des mesures tend vers une loi normale, également appelée *loi de Laplace–Gauss*, à partir du moment où nous accroissons le nombre de mesures. La distribution, indiquée dans la Figure 87, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \,. \tag{90}$$

Le carré de l'écart type, σ^2, est également appelé la *variance*. Pour une loi gaussienne des valeurs de mesure, $2,35\sigma$ est la largeur totale de la courbe à la moitié du maximum. Défi 278 e

Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*, on ne peut généralement que les estimer, seulement. Cette estimation est souvent ajoutée aux erreurs aléatoires pour produire une erreur expérimentale *totale*, également parfois dénommée *incertitude totale*. Réf. 231

Les tableaux qui suivent fournissent les valeurs des constantes physiques et des propriétés des particules les plus importantes, en unités du SI et dans quelques autres unités courantes, comme on les trouve dans les sources de référence. Ces valeurs sont les Réf. 232

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

moyennes mondiales des meilleures mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les biais expérimentaux, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type dans les derniers chiffres, par exemple 0,31(6) signifie – *grosso modo* – $0,31 \pm 0,06$. En réalité, derrière chacun des nombres qui apparaissent dans les tableaux suivants se cache une longue histoire qu'il serait digne de conter, mais pour lesquelles nous n'avons pas suffisamment de place ici*.

Quelles sont les limites à l'exactitude et à la précision ? Il n'existe aucun procédé, même en principe, permettant de mesurer une longueur x jusqu'à une *précision* supérieure à environ 61 chiffres, parce que $\Delta x/x > l_{\mathrm{Pl}}/d_{\mathrm{horizon}} = 10^{-61}$. (Cela est-il également vrai pour la force ou pour le volume ?) Dans la dernière partie de notre texte, l'examen des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique.

Défi 279 pe
Page ??

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus strictes. Aucune machine imaginable ne peut mesurer des quantités avec une précision plus élevée que la mesure du diamètre de la Terre à une incertitude près égale à la longueur la plus petite jamais mesurée, soit 10^{-19} m environ, c'est-à-dire environ 26 chiffres de précision. En utilisant une limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1 000 m, on obtient une limite de 22 chiffres. Si, comme nous l'avons prédit plus haut, les mesures du temps atteignent vraiment 17 chiffres de précision, alors elles seront proches de la limite pratique, parce que mis à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire : le coût. En réalité, un chiffre supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent qu'il faille un chiffre supplémentaire dans le coût de l'équipement.

Constantes physiques fondamentales

Réf. 232

En principe, toutes les propriétés quantitatives de la matière peuvent être calculées avec la théorie quantique. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques peuvent être prédites en faisant appel aux valeurs des constantes qui suivent, en utilisant les équations du modèle standard de la physique des hautes énergies.

TABLEAU 26 Constantes physiques fondamentales.

Quantité	Symbole	Valeur unités SI	Incert.[a]
nombre de dimensions d'espace-temps		3 + 1	0 [b]
vitesse de la lumière dans le vide[c]	c	299 792 458 m/s	0
perméabilité magnétique du vide[c]	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	0
		= 1,256 637 061 435 ... μH/m	0
permittivité diélectrique du vide[c]	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8,854 187 817 620 ... pF/m	0
constante de Planck originale	h	$6,626\,068\,76(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
constante de Planck réduite	$\hbar$	$1,054\,571\,596(82) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
charge du positron	e	0,160 217 646 2(63) aC	$3,9 \cdot 10^{-8}$

* Certains de ces récits peuvent être retrouvés dans l'ouvrage de N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, à partir duquel sont tirés les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une magnifique introduction en est donnée par J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero : Frontiers of Physics*, Freeman, 1988.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.[a]
constante de Boltzmann	k	$1{,}380\,650\,3(24)\cdot 10^{-23}$ J/K	$1{,}7\cdot 10^{-6}$
constante gravitationnelle	G	$6{,}673(10)\cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1{,}5\cdot 10^{-3}$
constante de couplage gravit.	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2{,}076(3)\cdot 10^{-43}$ s^2/kg m	$1{,}5\cdot 10^{-3}$
constante de structure fine[d],	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	$1/137{,}035\,999\,76(50)$	$3{,}7\cdot 10^{-9}$
constante de couplage e.m.	$= g_{\text{em}}(m_e^2c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,533(27)$	$3{,}7\cdot 10^{-9}$
constante de couplage de Fermi[d],	$G_F/(\hbar c)^3$	$1{,}166\,39(1)\cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$8{,}6\cdot 10^{-6}$
constante de couplage faible	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	$1/30{,}1(3)$	$1\cdot 10^{-2}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	$0{,}231\,24(24)$	$1{,}0\cdot 10^{-3}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W$ (enveloppe) $= 1-(m_W/m_Z)^2$	$0{,}2224(19)$	$8{,}7\cdot 10^{-3}$
constante de couplage fort[d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	$0{,}118(3)$	$25\cdot 10^{-3}$

a. Incertitude : écart-type des erreurs de mesure.
b. De 10^{-19} m et jusqu'à 10^{26} m, uniquement.
c. Définition numérique de la constante. (La permittivité diélectrique du vide est aussi appelée constante électrique et la perméabilité du vide, constante magnétique [N.D.T.].)
d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion de $Q^2 = m_e^2c^2$, ce qui est la valeur la plus petite possible. Pour des transferts d'impulsion plus élevés elle possède des valeurs plus grandes, par exemple $g_{\text{em}}(Q^2 = M_W^2c^2) \approx 1/128$. La constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs supérieures pour des transferts d'impulsion moins importants, par exemple $\alpha_s(34\,\text{GeV}) = 0{,}14(2)$.

Page ??

Pourquoi toutes ces constantes possèdent-elles les valeurs qu'elles ont ? La réponse est différente dans chacune des situations. Pour toute constante possédant une dimension, tel que le quantum d'action $\hbar$, la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1{,}054\cdot 10^{-34}$ Js à cause de la définition du SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante dimensionnelle n'est pas plus grande ni plus petite nous oblige toujours à comprendre l'origine de certains nombres sans dimension qui donnent le rapport entre la constante et l'unité naturelle correspondante. La compréhension des tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, de la durée des processus moléculaires et atomiques, ou de la masse des noyaux et des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clé de la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et ainsi de toutes les constantes sans dimension. L'histoire des rapports les plus importants est contée dans la partie qui conclut cette aventure.

Les constantes fondamentales engendrent les observations utiles suivantes, de haute précision.

TABLEAU 27 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	$376{,}730\,313\,461\,77\ldots\ \Omega$	0
nombre d'Avogadro	N_A	$6{,}022\,141\,99(47)\cdot 10^{23}$	$7{,}9\cdot 10^{-8}$
constante de Rydberg[a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$10\,973\,731{,}568\,549(83)\,\text{m}^{-1}$	$7{,}6\cdot 10^{-12}$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 916 96(28) µS	$3,7 \cdot 10^{-9}$
quantum du flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 636(81) pWb	$3,9 \cdot 10^{-8}$
rapport de fréquence de Josephson	$2e/h$	483,597 898(19) THz/V	$3,9 \cdot 10^{-8}$
constante de von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 572(95) Ω	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 008 99(37) yJ/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 4925(11) GHz/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 m_e c^2$	2,817 940 285(31) fm	$1,1 \cdot 10^{-8}$
longueur d'onde de Compton	$\lambda_c = h/m_e c$	2,426 310 215(18) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
de l'électron	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0,386 159 264 2(28) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
rayon de Bohr[a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 720 83(19) pm	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	5,050 783 17(20) $\cdot 10^{-27}$ J/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rapport de masse proton–électron	m_p/m_e	1 836,152 667 5(39)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
constante de Stefan–Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,704 00(40) nW/m^{2}K^4	$7,0 \cdot 10^{-6}$
constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{max} T$	2,897 768 6(51) mmK	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante de conversion de bits en entropie		10^{23} bit = 0,956 994 5(17) J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
contenu énergétique du TNT		de 3,7 à 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Certaines propriétés générales de la nature sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, pouvez-vous déterminer si une quelconque propriété de l'Univers lui-même est listée ?)

Défi 280 s

TABLEAU 28 Constantes astrophysiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante gravitationnelle	G	6,672 59(85) $\cdot 10^{-11}$ m^3/kg s^2
constante cosmologique	Λ	env. $1 \cdot 10^{-52}$ m^{-2}
année tropicale en 1900[a]	a	31 556 925,974 7 s
année tropicale en 1994	a	31 556 925,2 s
jour sidéral moyen	d	$23^h 56' 4,090\,53''$
année-lumière	al	9,460 528 173 … Pm
unité astronomique[b]	ua	149 597 870,691(30) km
parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
âge de l'Univers[c]	t_0	4,333(53) $\cdot 10^{17}$ s = 13,73(0,17) $\cdot 10^9$ a
(déterminé par l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
âge de l'Univers[c]	t_0	3,5(4) $\cdot 10^{17}$ s = 11,5(1,5) $\cdot 10^9$ a, au plus
(déterminé par la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la mécanique quantique)		
constante de Hubble[c]	H_0	2,3(2) $\cdot 10^{-18}$ s^{-1} = 0,73(4) $\cdot 10^{-10}$ a^{-1}
	$H_0 = h_0 \cdot 100$ km/sMpc = $h_0 \cdot 1{,}0227 \cdot 10^{-10}$ a^{-1}	

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante de Hubble réduite[c]	h_0	0,71(4)
paramètre de décélération	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	$-0,66(10)$
distance de l'horizon de l'Univers[c]	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26}$ m = 13,0(2) Gpc
topologie de l'Univers		inconnue
nombre de dimensions spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
densité critique	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
de l'Univers		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
paramètre de densité (totale)[c]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
paramètre de densité baryonique[c]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
paramètre de densité	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
de matière noire froide[c]		
paramètre de densité des neutrinos[c]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0,001 à 0,05
paramètre de densité	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
de l'énergie sombre[c]		
paramètre de l'équation d'état	$w = p_X/\rho_X$	$-1,0(2)$
de l'énergie sombre		
masse baryonique	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27}$ kg
densité baryonique		0,25(1) /m^3
densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28}$ kg/m^3
étoiles dans l'Univers	n_e	$10^{22\pm1}$
baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81\pm1}$
température du fond diffus	T_0	2,725(1) K
micro-onde[d]		
photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31}$ kg/m^3
densité de photons		410,89 /cm^3 ou 400 /cm^3 $(T_0/2,7\,\mathrm{K})^3$
amplitude des perturbations	$\sqrt{S}$	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
de densité		
amplitude des ondes	$\sqrt{T}$	$< 0,71\sqrt{S}$
gravitationnelles		
fluctuations de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
indice spectral scalaire	n	0,93(3)
variation de l'indice spectral	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	-0,03(2)
longueur de Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35}$ m
temps de Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44}$ s
masse de Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 µg
nombre d'instants dans l'histoire[c]	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
points de l'espace-temps	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot$	$10^{244\pm1}$
dans l'horizon[c]	(t_0/t_{Pl})	
masse dans l'horizon	M	$10^{54\pm1}$ kg

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

a. Définition de la constante, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Rappelez-vous : π secondes représentent à peu près un nanosiècle.) La valeur de 1990 compte environ 0,7 s de moins, correspondant à un ralentissement d'approximativement 0,2 ms/a. (Faites attention : pourquoi ?) Il existe même une formule empirique pour évaluer la variation de la durée de l'année au cours du temps.

Défi 281 s
Réf. 233

b. Distance moyenne Terre–Soleil. Cette précision vraiment stupéfiante de 30 m résulte des durées moyennes de propagation des signaux envoyés par les navettes spatiales Viking en orbite et les atterrisseurs martiens, récoltées durant une période de plus de vingt ans.

c. L'indice 0 représente les valeurs d'aujourd'hui.

d. Ce rayonnement fut produit lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3 000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui déclenchèrent la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4\,\mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6}\ T_0$.

Page 210

Soyez vigilants : dans l'ultime partie de cet ouvrage on montre qu'un grand nombre des constantes du Tableau 14 *ne* sont *pas* des quantités physiquement raisonnables. Elles doivent être considérées avec beaucoup de circonspection. Les constantes plus spécifiques données dans le tableau qui suit sont toutes raisonnables, cependant.

TABLEAU 29 Constantes astronomiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
masse de la Terre	$M_{\earth}$	$5{,}972\,23(8) \cdot 10^{24}$ kg
longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{\earth} = 2GM/c^2$	8,870(1) mm
rayon de la Terre, à l'équateur[a]	$R_{\earth\text{eq}}$	6 378,1367(1) km
rayon de la Terre, aux pôles[a]	$R_{\earth\text{p}}$	6 356,7517(1) km
distance Équateur–pôle[a]		10 001,966 km (moyenne)
aplatissement de la Terre[a]	$e_{\earth}$	1/298, 25231(1)
densité moyenne de la Terre	$\rho_{\earth}$	5,5 Mg/m^3
âge de la Terre	$T_{\earth}$	4,55 Ga = 143 Ps
rayon de la Lune	$R_{\moon\,\text{v}}$	1 738 km dans la direction de la Terre
rayon de la Lune	$R_{\moon\,\text{h}}$	1 737,4 km dans les deux autres directions
masse de la Lune	$M_{\moon}$	$7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg
distance moyenne de la Lune[b]	$d_{\moon}$	384 401 km
distance de la Lune au périgée[b]		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
distance de la Lune à l'apogée[b]		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
taille angulaire de la Lune[c]		en moyenne $0,5181° = 31,08'$, minimum $0,49°$, maximum - ligne la plus courte $0,55°$
densité moyenne de la Lune	$\rho_{\moon}$	3,3 Mg/m^3
masse du Soleil	$M_{\odot}$	$1{,}988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
longueur gravitationnelle du Soleil	$l_{\odot} = 2GM_{\odot}/c^2$	2,953 250 08 km
luminosité du Soleil	$L_{\odot}$	384,6 YW
rayon solaire équatorial	$R_{\odot}$	695,98(7) Mm

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
taille angulaire du Soleil		0,53° en moyenne ; minimum le quatre juillet (aphélie) 1888″, maximum le quatre janvier (périhélie) 1952″
densité moyenne du Soleil	$\rho_\odot$	1,4 Mg/m^3
distance moyenne du Soleil	UA	149 597 870,691(30) km
âge du Soleil	$T_\odot$	4,6 Ga
vitesse solaire autour du centre de la galaxie	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
vitesse solaire par rapport au fond diffus cosmologique	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
distance au centre galactique		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
âge de la Voie lactée		13,6 Ga
taille de la Voie lactée		env. 10^{21} m ou 100 kal
masse de la Voie lactée		10^{12} masses solaires, env. $2 \cdot 10^{42}$ kg
masse de Jupiter	$M_{♃}$	$1{,}90 \cdot 10^{27}$ kg
rayon jovien équatorial	$R_{♃}$	71,398 Mm
rayon jovien polaire	$R_{♃}$	67,1(1) Mm
distance moyenne de Jupiter au Soleil	$D_{♃}$	778 412 020 km
galaxie connue la plus éloignée	1835 IR1916	$13{,}2 \cdot 10^9$ al = $1{,}25 \cdot 10^{26}$ m, redshift 10

a. La forme de la Terre est décrite de la manière la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation largement développée de ses contextes et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union Géodésique et Géophysique Internationale révisa les données en l'an 2000. Les rayons et l'aplatissement donnés ici sont ceux du système de marée « mean tide system ». Ils diffèrent de 0,7 m environ de ceux du système de marée « zero tide system » et de d'autres systèmes. Les particularités de ce domaine représentent une science à part.
b. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, consultez la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html et les autres pages du même site.
c. Les angles sont définis comme suit : 1 degré = 1° = π/180 rad, 1 (première) minute d'arc = 1′ = 1°/60, 1 seconde (minute) d'arc = 1″ = 1′/60. Les anciennes unités « tierce minute d'arc » et « quarte minute d'arc », valant chacune 1/60e de la précédente, ne sont plus utilisées. (« Minute » signifiait à l'origine « très petit », comme c'est toujours le cas dans l'anglais moderne.)

NOMBRES UTILES

π	$3,14159\,26535\,89793\,23846\,26433\,83279\,50288\,41971\,69399\,37510_5$
e	$2,71828\,18284\,59045\,23536\,02874\,71352\,66249\,77572\,47093\,69995_9$
γ	$0,57721\,56649\,01532\,86060\,65120\,90082\,40243\,10421\,59335\,93992_3$
ln 2	$0,69314\,71805\,59945\,30941\,72321\,21458\,17656\,80755\,00134\,36025_5$
ln 10	$2,30258\,50929\,94045\,68401\,79914\,54684\,36420\,76011\,01488\,62877_2$
$\sqrt{10}$	$3,16227\,76601\,68379\,33199\,88935\,44432\,71853\,37195\,55139\,32521_6$

Réf. 234

Si le nombre π est *normal*, c'est-à-dire si les chiffres et les combinaisons de chiffres

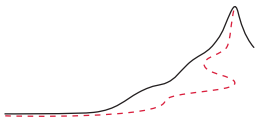
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

dans ses développements décimaux apparaissent tous avec la même fréquence limite, alors tous les textes qui ont été écrits ou qui vont l'être, de même que tous les mots qui ont été prononcés ou qui vont l'être, peuvent être retrouvés de manière codée dans ses suites. La propriété de normalité n'a pas encore été démontrée, bien qu'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la science soit encodée dans le simple cercle ? Non. Cette propriété n'a rien de particulier : elle s'applique également au nombre 0, 12345678910111213141516171819202 1.... et de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples ?

Défi 282 s

Par ailleurs, dans le graphe de la fonction exponentielle e^x, le point $(0,1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez colorier en bleu tous les points situés sur le plan et ayant deux coordonnées rationnelles, ce plan paraîtrait quasiment bleu. Néanmoins, le graphe passe par un de ces points seulement et parvient à éviter tous les autres.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



BIBLIOGRAPHIE

> « [...] moi, qui trouve toujours tous les livres trop longs, et surtout les miens [...] »
>
> Voltaire, *Lettre à M. Cideville.*

1 Julian Schwinger, L. L. DeRaad, K. A. Milton & W. Y. Tsai, *Classical Electrodynamics*, Perseus, 1998. Un excellent texte sur ce sujet, rédigé par les plus grands maîtres du domaine.

Consultez aussi le magnifique ouvrage de problèmes d' André Butoli & Jean-Marc Lévy-Leblond, *La physique en questions – électricité et magnétisme*, Vuibert, 1999. Cité aux pages 14 et 57.

2 Consultez le site Web du Particle Data Group, la référence mondiale, sur at pdg.web.cern.ch. Lisez également H. Jeon & M. Longo, Search for magnetic monopoles trapped in matter, *Physical Review Letters* **75**, pp. 1443–1447, 1995. Consultez aussi A. S. Goldhaber & W. P. Trower, Resource letter MM-1 : magnetic monopoles, *American Journal of Physics* **58**, pp. 429–439, 1990. Cité en page 16.

3 R. Edwards, Filling station fires spark cars' recall, *New Scientist*, pp. 4–5, 4 mars 1995. Cité en page 18.

4 S. Desmet, F. Orban & F. Grandjean, On the Kelvin electrostatic generator, *European Journal of Physics* **10**, pp. 118–122, 1989. Vous pouvez aussi trouver des plans de construction de celui-ci sur divers sites Internet. Cité en page 19.

5 Pour visualiser une gravure du paratonnerre original de Franklin, lisez E. P. Krider, Benjamin Franklin and lightning rods, *Physics Today* **59**, pp. 42–48, 2006. Cité en page 20.

6 W. Rueckner, An improved demonstration of charge conservation, *American Journal of Physics* **75**, pp. 861–863, 2007. Cité en page 21.

7 Pour avoir plus d'informations sur les diverses unités électromagnétiques, lisez l'ouvrage de référence de J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Cité en page 24.

8 Lisez les articles anciens mais admirables de Richard C. Tolman & T. Dale Stewart, The electromotive force produced by the acceleration of metals, *Physical Review* **8**, pp. 97–116, 1916, Richard C. Tolman & T. Dale Stewart, The mass of the electric carrier in copper, silver and aluminium, *Physical Review* **9**, pp. 164–167, 1917, et l'expérience ultérieure mais beaucoup plus précise de C. F. Kettering & G. G. Scott, Inertia of the carrier of electricity in copper and aluminum, *Physical Review* **66**, pp. 257–267, 1944. (Manifestement, la langue américaine omettait le « i » d'aluminium durant cette période.) Le premier de ces articles, qui est également une synthèse des percées précédentes, expose en détail l'expérience. Le dernier article indique ce qui devait être pris en compte pour atteindre une précision suffisante. Cité en page 27.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

9 Cet effet a été mesuré pour la première fois par S. J. Barnett, A new electron-inertia effect and the determination of m/e for the free electron in copper, *Philosophical Magazine* **12**, p. 349, 1931. Cité en page 27.

10 Lisez par exemple C. Schiller, A. A. Koomans, van Rooy, C. Schönenberger & H. B. Elswijk, Decapitation of tungsten field emitter tips during sputter sharpening, *Surface Science Letters* **339**, pp. L925–L930, 1996. Cité en page 27.

11 L. I. Schiff & M. V. Barnhill, Gravitational-induced electric field near a metal, *Physical Review* **151**, pp. 1067–1071, 1966. F. C. Witteborn & W. M. Fairbank, Experimental comparison of the gravitational force on freely falling electrons and metallic electrons, *Physical Review Letters* **19**, pp. 1049–1052, 1967. Cité en page 28.

12 J. Lepak & M. Crescimanno, Speed of light measurement using ping, prépublication électronique disponible sur arxiv.org/abs/physics/0201053. Cité en page 28.

13 Cette anecdote fut contée par le *Wall Street Journal* en décembre 2006 : lisez online.wsj.com/article_print/SB116615315551251136.html. Cité en page 28.

14 Pierre de Maricourt, *Tractatus de magnete*, 1269. Cité en page 30.

15 R. Wiltschko & W. Wiltschko, *Magnetic Orientation in Animals*, Springer, Berlin, 1995. Cité en page 31.

16 Le rapport entre le moment cinétique L et le moment magnétique M est

$$\frac{L}{M} = \frac{2m}{e} \cdot \frac{1}{g} \,, \tag{91}$$

où e représente la charge de l'électron et m sa masse. L et M sont tous les deux mesurables. Les premières mesures furent publiées avec une valeur pour g de 1, certainement parce que les auteurs ne connaissaient pas cette valeur. Dans les expériences ultérieures, de Haas a trouvé d'autres valeurs. Les mesures effectuées par d'autres chercheurs donnaient des valeurs plus proches de 2 que de 1, une réalité qui ne fut comprise qu'avec la découverte du spin. Les publications originales sont A. Einstein & W. J. de Haas, Proefondervinderlijk bewijs voor het bestaan der moleculaire stroomen van Ampère, *Konninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Verslagen* **23**, p. 1449, 1915, et A. Einstein & W. J. de Haas, Experimental proof of the existence of Ampère's molecular currents, *Konninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Proceedings* **18**, p. 696, 1916. Cité en page 34.

17 S. J. Barnett, Magnetization by rotation, *Physical Review* **6**, pp. 171–172, 1915, et S. J. Barnett, Magnetization by rotation, *Physical Review* **6**, pp. 239–270, 1915. Cité en page 34.

18 Lisez J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998, ou également R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw–Hill, 1961. Cité aux pages 38 et 57.

19 Le meilleur ouvrage sur le cerveau est celui de Eric R. Kandel, James H. Schwartz & Thomas M. Jessell, *Principles of Neural Science*, 5th edition, McGraw-Hill, 2000. Le site Web suhep.phy.syr.edu/courses/modules/MM/brain/brain.html fournit une introduction à la physiologie du cerveau. Cité en page 38.

20 N. Salingaros, Invariants of the electromagnetic field and electromagnetic waves, *American Journal of Physics* **53**, pp. 361–363, 1985. Cité en page 39.

21 de la Torre, V⩽ c in 1820 ?, *European Journal of Physics* **20**, pp. L23–L24, mars 1999. Cité en page 40.

22 J. A. Heras, Can Maxwell's equations be obtained from the continuity equation ?, *American Journal of Physics* **75**, pp. 652–657, 2007. Cité aux pages 42 et 150.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

23 Un résumé similaire constitue le fondement de Friedrich W. Hehl & Yuri N. Obukov, *Foundations of Classical Electrodynamics – Charge, Flux and Metric*, Birkhäuser 2003. Cité en page 42.

24 R. H. Tyler, S. Maus & H. Lühr, Magnetic signal due to ocean tidal flow identified in satellite observations, *Science* **299**, pp. 239–241, 2003. Les films issus de ces données peuvent être consultés sur le site Web www.tu-bs.de/institute/geophysik/spp/publikationen.html. Cité en page 47.

25 H. Montgomery, Unipolar induction : a neglected topic in the teaching of electromagnetism, *European Journal of Physics* **20**, pp. 271–280, 1999. Cité en page 48.

26 Pour l'état de l'art sur la dynamo terrestre, lisez l'article de P. H. Roberts & G. A. Glatzmaier, Geodynamo theory and simulations, *Reviews of Modern Physics* **72**, pp. 1081–1123, 2000. Celui-ci est plus ancien : R. Jeanloz & B. Romanowicz, Geophysical dynamics at the center of the Earth, *Physics Today*, pp. 22–27, août 1997. Cité aux pages 48 et 132.

27 J. Yang, F. Lu, L. W. Kostiuk & D. Y. Kwok, Electrokinetic microchannel battery by means of electrokinetic and microfluidic phenomena, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **13**, pp. 963–970, 2003. Cité en page 50.

28 Oleg D. Jefimenko, A relativistic paradox seemingly violating conservation of momentum law in electromagnetic systems, *European Journal of Physics* **20**, pp. 39–44, 1999. Bien évidemment, la quantité de mouvement manquante se retrouve dans le champ électromagnétique. Étant donné que le moment électromagnétique est exprimé par le potentiel vecteur, êtes-vous capable de vérifier que tout s'accorde comme il le faut ? Cité en page 56.

Défi 283 pe

29 H. Van Dam & E. P. Wigner, Classical relativistic mechanics of interacting point particles, *Physical Review* **136B**, pp. 1576–1582, 1965. Cité en page 56.

30 Mark D. Semon & John R. Taylor, Thoughts on the magnetic vector potential, *American Journal of Physics* **64**, pp. 1361–1369, 1996. Cité aux pages 57, 59 et 60.

31 Jean Sivardière, Simple derivation of magnetic vector potentials, *European Journal of Physics* **14**, pp. 251–254, 1993. Cité en page 58.

32 T. T. Wu & C. N. Yang, Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields, *Physical Review D* **12**, pp. 3845–3857, 1975. Cité en page 61.

33 Ce qui suit est un texte sur l'électrodynamique entièrement rédigé à l'aide du formalisme (mathématique) : Kurt Meetz & Walter L. Engl, Elektromagnetische Felder – mathematische und physikalische Grundlagen, Springer, 1980. Cité en page 62.

34 J. Travis, Twirl those organs into place – getting to the heart of how a heart knows left from right, *Science News* **156**, 21 août 1999. Un excellent ouvrage sur les asymétries dans la nature : H. Brunner, *Rechts oder links*, Wiley–Vch, 1999. Cité en page 64.

35 Lisez par exemple la discussion donnée par M. C. Corballis & I. L. Beale, On telling left from right, *Scientific American* **224**, pp. 96–104, mars 1971. Cité en page 65.

36 Wolfgang Rindler, *Essential Relativity – Special, General, and Cosmological*, revised 2nd edition, Springer Verlag, 1977, page 247. Il y a également le magnifique article de M. Le Bellac & J.-M. Lévy-Leblond, Galilean electrodynamics, *Nuovo Cimento B* **14**, p. 217, 1973, qui expose les possibilités qui existent mais également les problèmes qui surgissent lorsque nous tentons de définir la théorie sans faire usage de la relativité. Cité en page 67.

37 L.-C. Tu, J. Luo & G. T. Gilles, The mass of the photon, *Reports on Progress of Physics* **68**, pp. 77–130, 2005. Cité en page 67.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

38 Pour un compte rendu captivant sur l'histoire des idées sur la lumière, lisez David Park, *The Fire Within the Eye : a Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*, Princeton University Press, 1997. Cité en page 70.

39 Lisez le livre de Raymond L. Lee & Alistair B. Fraser, *The Rainbow Bridge : Rainbows in Art, Myth, and Science*, Pennsylvania State University Press, 2000. Un chapitre peut être consulté sur le site Web www.nadn.navy.mil/Oceanography/RainbowBridge/Chapter_8.html. Cité en page 74.

40 Cette admirable expérience de fente fut publiée par E. A. Montie, E. C. Cosman, G. W. 't Hooft, M. B. van der Mark & C. W. J. Beenakker, Observation of the optical analogue of quantized conductance of a point contact, *Nature* **350**, pp. 594–595, 18 avril 1991, et dans la version plus longue E. A. Montie, E. C. Cosman, G. W. 't Hooft, M. B. van der Mark & C. W. J. Beenakker, Observation of the optical analogue of the quantized conductance of a point contact, *Physica B* **175**, pp. 149–152, 1991. Ce résultat fut également publié dans de nombreuses autres revues scientifiques. Cité en page 74.

41 Une mesure récente de la fréquence de la lumière est présentée dans Th. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz & T. W. Hausch, Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S–2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain, *Physical Review Letters* **79**, pp. 2646–2649, 6 octobre 1997. Une autre se trouve dans C. Schwob, L. Jozefowski, de Beauvoir, L. Hilico, F. Nez, L. Julien, F. Biraben, O. Acef & A. Clairon, Optical frequency measurement of the 2S–12D transitions in hydrogen and deuterium : Rydberg constant and Lamb shift determinations, *Physical Review Letters* **82**, pp. 4960–4963, 21 juin 1999. Cité en page 75.

42 Les découvreurs de deux méthodes de ce type furent récompensés par le prix Nobel de physique en 2005. Cité en page 75.

43 Regardez par exemple G. Horváth, J. Gál & R. Wehner, Why are water-seeking insects not attracted by mirages ? The polarization pattern of mirages, *Naturwissenschaften* **83**, pp. 300–303, 1997. Cité en page 76.

44 W. K. Haidinger, Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts, *Poggendorf's Annalen* **63**, pp. 29–39, 1844, W. K. Haidinger, Beobachtung des Lichtpolarisationsbüschels in geradlinig polarisiertem Lichte, *Poggendorf's Annalen* **68**, pp. 73–87, 1846, W. K. Haidinger, Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut, *Poggendorf's Annalen* **93**, pp. 318–320, 1854. Cité en page 77.

45 Lisez le chapitre sur les brosses de polarisation, dans Marcel G. J. Minnaert, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, ou la série d'ouvrages originaux, Marcel G. J. Minnaert, *De natuurkunde van 't vrije veld*, Thieme & Cie, 1937. Pour plus de précisions, lisez G. P. Mission, Form and behaviour of Haidinger's brushes, *Ophthalmology and Physiological Optics* **137**, pp. 392–396, 1993, ou J. Grebe-Ellis, Zum Haidinger-Büschel, 2002, sur didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/haidinger.pdf. Sur le phénomène de biréfringence de l'œil, lisez L. Bour, Een eigenaardige speling der natuur, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **67**, pp. 362–364, décembre 2001. En particulier, une photographie de l'œil utilisant l'illumination rectilignement polarisée et prise à travers un analyseur révèle une *croix* noire dans la pupille. Cité en page 78.

46 K. L. Kelly, Color designations for colored lights, *Journal of the Optical Society of America* **33**, pp. 627–632, 1943. Cité en page 82.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

47 La référence standard sur la propagation de la lumière est Max Born & Emil Wolf, *Principles of Optics – Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Pergamon Press, 6th edition, 1998. Cité en page 86.

48 Pour une introduction sur le halo de 22°, le halo de 46°, les parhélies, et les nombreux autres arcs et anneaux qui peuvent être aperçus autour du Soleil, lisez le texte magnifiquement illustré de R. Greenler, Lichterscheinungen, Eiskristalle und Himmelsarchäologie, *Physikalische Blätter* **54**, pp. 133–139, 1998, ou le livre de Robert Greenler, *Rainbows, Halos, and Glories*, Cambridge University Press, 1980. Cité en page 89.

49 Lisez-le en ligne sur fermi.imss.fi.it/rd/bdv?/bdviewer/bid=000000300682. Cité en page 89.

50 James E. Faller & Joseph Wampler, The lunar laser reflector, *Scientific American* pp. 38–49, mars 1970. Cité en page 90.

51 Neil Armstrong sur Apollo 11, Jim Lovell sur Apollo 8 et Apollo 13, et Jim Irwin sur Apollo 15 l'ont scrupuleusement recherchée et répondirent alors par la négative, comme cela est conté dans *Science News*, p. 423, 24 & 31 décembre 1994. À partir de la Station spatiale cependant, qui gravite à seulement quelques centaines de kilomètres au-dessus de la Terre, la muraille *peut* être vue lorsque le Soleil est suffisamment bas de telle manière que celle-ci paraisse plus large grâce à son ombre, comme expliqué dans *Science News* **149**, p. 301, 1996. Cité en page 90.

52 Des photographies supplémentaires de mirages, voire des films peuvent être consultés sur www.polarimage.fi/mirages/mirages.htm et virtual.finland.fi/netcomm/news/showarticle.asp?intNWSAID=25722. Cité en page 90.

53 M. Shih, M. Segev & G. Salamo, *Physical Review Letters* **78**, pp. 2551–2554, 1997. Lisez également l'article plus accessible de Mordechai Segev & George Stegeman, Self-trapping of optical beams : spatial solitons, *Physics Today* **51**, pp. 42–48, août 1998. Cité en page 91.

54 La première explication correcte du moulin à lumière a été donnée par Osborne Reynolds, On certain dimensional properties of matter in the gaseous state, *Royal Society Philosophical Transactions* Part 2, 1879. La meilleure discussion est celle donnée sur le Web par Phil Gibbs, dans la liste des foires aux questions (FAQ) du forum de discussion sci.physics, elle est disponible sur le site Web www.desy.de/user/projects/Physics/light-mill.html. Cité en page 95.

55 P. Lebedew, Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes, *Annalen der Physik* **6**, pp. 307–458, 1901. Lebedew confirma le résultat de Kepler qui établit que la pression de la lumière est à la base du changement de direction des queues des comètes lorsqu'elles tournent autour du Soleil. Cité en page 95.

56 P. Galajda & P. Ormos, *Applied Physics Letters* **78**, p. 249, 2001. Cité en page 95.

57 Un bref aperçu en est donné par Miles Padgett & Les Allen, Optical tweezers and spanners, *Physics World* pp. 35–38, septembre 1997. Les articles originaux du groupe d'Ashkin sont A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm & S. Chu, Observation of a gradient force optical trap for dielectric particles, *Optics Letters* **11**, p. 288, 1986, et A. Ashkin, J. M. Dziedzic & T. Yamane, Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams, *Nature* **330**, p. 769, 1987. Une explication pédagogique sur les clés à molettes optiques, comprenant une méthode pour en construire une, peut être trouvée dans D. N. Moothoo, J. Arlt, R. S. Conroy, F. Akerboom, A. Voit & K. Dholakia, Beth's experiment using optical tweezers, *American Journal of Physics* **69**, pp. 271–276, 2001, et dans S. P. Smith, S. R. Bhalotra, A. L. Brody, B. L. Brown, E. K. Boyda & M. Prentiss, Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories, *American Journal of Physics* **67**, pp. 26–35, 1999. Cité en page 95.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

58 R. A. Beth, Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light, *Physical Review* **50**, p. 115, 1936. Pour des mesures plus récentes, lisez N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen & M. J. Padgett, Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light : an optical spanner, *Optics Letters* **22**, pp. 52–54, 1997, et M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg & H. Rubinsztein-Dunlop, Optical torque controlled by elliptical polarization, *Optics Letters* **23**, pp. 1–3, 1998. Consultez aussi J. H. Poynting, The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light, *Proceedings of the Royal Society London A* **82**, pp. 560–567, 1908. Cité en page 96.

59 A. Valenzuela, G. Haerendel, H. Föppl, F. Melzner, H. Neuss, E. Rieger, J. Stöcker, O. Bauer, H. Höfner & J. Loidl, The AMPTE artificial comet experiments, *Nature* **320**, pp. 700–703, 1986. Cité en page 96.

60 Lisez le texte en latin de Dietrich von Freiberg *De iride et radialibus impressionibus*, v. 1315. Cité en page 98.

61 J. Walker, Multiple rainbows from single drops of water and other liquids, *American Journal of Physics* **44**, pp. 421–433, 1976, et How to create and observe a dozen rainbows in a single drop of water, *Scientific American* **237**, pp. 138–144, 1977. Regardez aussi K. Sassen, Angular scattering and rainbow formation in pendant drops, *Journal of the Optical Society of America* **69**, pp. 1083–1089, 1979. Cité en page 99.

62 La coloration de la bordure du Soleil qui en résulte est clairement indiquée sur la page Web d'Andrew Young mintaka.sdsu.edu/GF/explain/simulations/std/rims.html. Son site Web mintaka.sdsu.edu/GF fournit la meilleure explication du flash vert, y compris les différentes variétés qui existent (expliquées sur mintaka.sdsu.edu/GF/papers/Zenit/glance.html), comment l'observer, et les très nombreux effets physiques concernés. Des simulations détaillées et une profusion de ressources sont disponibles. Lisez également son article : A. T. Young, Sunset science – III. Visual adaptation and green flashes, *Journal of the Optical Society of America A* **17**, pp. 2129–2139, 2000. Cité en page 99.

63 Il existe également d'autres manières de voir ce rayon vert, sur des durées plus longues, à savoir lorsqu'un mirage apparaît au coucher du soleil. Une explication appuyée par des photographies en couleurs se trouve dans M. Vollmer, Gespiegelt in besonderen Düften ...– Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana, *Physikalische Blätter* **54**, pp. 903–909, 1998. Cité en page 99.

64 Regardez le merveilleux site Web de Les Cowley sur l'optique atmosphérique, www.atoptics.co.uk. Ou le livre de David K. Lynch & William Livingston, *Color and Light in Nature*, 2nd edition, Cambridge University Press, 2001. Ils ont étendu et remis au goût du jour cette fascination pour les couleurs dans la nature, comme les halos autour de la Lune et du Soleil, ou la couleur des ombres, qui avait été initiée par le magnifique livre classique de Marcel Minnaert mentionné à la page 70. Cité en page 99.

65 Cette célèbre découverte est due à Brent Berlin & Paul Kay, *Basic Color Terms : Their Universality and Evolution*, University of California Press, 1969. Leur *inventaire mondial des couleurs* en cours est ardemment attendu. Certes, il y a aussi des études en cours pour trouver des exceptions possibles, mais le fondement structurel est fermement établi, comme l'indiquent les comptes rendus de conférence C. L. Hardin & Luisa Maffi, *Colour Categories in Thought and Language*, Cambridge University Press, 1997. Cité en page 100.

66 Pour une discussion approfondie des diverses vitesses associées aux trains d'ondes, lisez l'ouvrage classique de Louis Brillouin, *Wave Propagation and Group Velocity*, Academic Press, New York, 1960. Il élargit en détail ce sujet discuté par Arnold Sommerfeld, Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien, *Annalen der Physik,* 4th

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

series, **44**, pp. 177–202, 1914. Consultez également Arnold Sommerfeld, *Optik*, Dietrichssche Verlagsbuchandlung, Wiesbaden 1950, section 22. Une traduction anglaise Arnold Sommerfeld, *Lectures on Theoretical Physics : Optics*, 1954, est également disponible. Cité aux pages 102 et 104.

67 La modification de la vitesse de groupe dans les fibres optiques est même possible maintenant sur demande, comme l'indiquent M. González-Herráez, K.-Y. Song & L. Thévenaz, Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering, *Applied Physics Letters* **87**, p. 081113, 2005. Ils exhibèrent des vitesses de groupe allant de 0,24*c* jusqu'à plus l'infini et, plus que cela, jusqu'aux valeurs négatives. Cité en page 103.

Une autre expérience fut menée par S. Chu & S. Wong, Linear pulse propagation in an absorbing medium, *Physical Review Letters* **48**, pp. 738–741, 1982. Lisez aussi S. Chu & D. Styer, Answer to question #52. Group velocity and energy propagation, *American Journal of Physics* **66**, pp. 659–661, 1998. Un autre exemple fut décrit en 1993 par le groupe de Raymond Chiao pour le cas de certains matériaux non linéaires dans R. Chiao, P. G. Kwait & A. M. Steinberg, Faster than light ?, *Scientific American* **269**, p. 52, août 1993, et R. Y. Chiao, A. E. Kozhekin & G. Kurizki, Tachyonlike excitations in inverted two-level media, *Physical Review Letters* **77**, pp. 1254–1257, 1996. Concernant un autre dispositif expérimental utilisant encore la dispersion anormale dans du gaz de césium, lisez L. J. Wang, A. Kuzmich & A. Dogarin, Gain-assisted superluminal light propagation, *Nature* **406**, pp. 277–279, 20 juillet 2000.

68 Y. P. Terletskii, *Paradoxes in the Theory of Relativity*, Plenum Press, 1968. Cité en page 104.

69 Lisez l'excellente explication de Kirk T. McDonald, Negative group velocity, *American Journal of Physics* **69**, pp. 607–614, 2001. Cité en page 104.

70 La prédiction de la réfraction négative est due à V. G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, *Soviet Physics Uspekhi* **10**, p. 509, 1968. (L'article original en russe est de 1967.) L'explication avec des directions différentes de réfraction fut publiée par P. M. Valanju, R. M. Walser & A. P. Valanju, Wave refraction in negative-index media : always positive and very inhomogeneous, *Physical Review Letters* **88**, p. 187401, 8 mai 2002. Le principe de Fermat est également revu, comme l'explique V. G. Veselago, About the wording of Fermat's principle for light propagation in media with negative refraction index, arxiv.org/abs/cond-mat/0203451. Cité en page 105.

71 Le premier exemple de système matériel ayant un indice de réfraction négatif fut présenté par David Smith et son équipe. R. A. Schelby, D. R. Smith & S. Schultz, Experimental verification of a negative index of refraction, *Science* **292**, p. 77-79, 2001. Des exemples plus récents se trouvent dans A. A. Houck, J. B. Brock & I. L. Chuang, Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law, *Physical Review Letters* **90**, p. 137401, 2003, C. G. Parazzoli, R. B. Greegor, K. Li, B. E. C. Koltenbah & M. Tanielian, Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law, *Physical Review Letters* **90**, p. 107401, 2003. S. Foteinopoulou, E. N. Economou & C. M. Soukoulis, Refraction in media with a negative refractive index, *Physical Review Letters* **90**, p. 107402, 2003. Cité en page 105.

72 S. A. Ramakrishna, Physics of negative refractive index materials, *Reports on Progress of Physics* **68**, pp. 449–521, 2005. Cité en page 106.

73 J. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens, *Physical Review Letters* **85**, p. 3966, 2000. Lisez aussi J. B. Pendry, D. Schurig & D. R. Smith, Controlling electromagnetic fields, *Science* **312**, pp. 1780–1782, 2006, et D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr & D. R. Smith, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science* **314**, pp. 977–980, 2006. Cité en page 106.

74 Sur les métamatériaux, lisez A. Lai, C. Caloz & T. Itoh, Composite right, left-handed transmission metamaterials, *IEEE Microwave Magazine* **5**, pp. 34–50, septembre 2004. Cité en page 106.

75 M. Zedler & P. Russer, Investigation on the Dispersion Relation of a 3D LC-based Metamaterial with an Omnidirectional Left-Handed Frequency Band, *2006 International Microwave Symposium Digest, San Francisco* pp. 1477–1479, 2006. M. Zedler, C. Caloz & P. Russer, A 3D Isotropic left-handed metamaterial based on the rotated transmission line matrix (TLM) scheme, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2007. Cité en page 106.

76 G. Nimtz, A. Enders & H. Spieker, *Journal de Physique I (Paris)* **4**, p. 565, 1994. Malheureusement, Nimtz semble croire lui-même qu'il a transporté de l'énergie ou des signaux plus rapidement que la lumière : il est soutenu par la critique, souvent influencée de façon déplorable, concernant ses expériences plutôt sophistiquées. Lisez A. Enders & G. Nimtz, *Physikalische Blätter* **49**, p. 1119, décembre 1993, et les réponses succinctes dans *Physikalische Blätter* **50**, p. 313, avril 1994. Regardez également A. M. Steinberg, *Journal de Physique I (Paris)* **4**, p. 1813, 1994, A. M. Steinberg, P. G. Kwiat & R. Y. Chiao, *Physical Review Letters* **71**, pp. 708–711, 1993, et A. Ranfagni, P. Fabeni, G. P. Pazzi & D. Mugnai, *Physical Review E* **48**, p. 1453, 1993. Cité en page 107.

77 Une synthèse de toutes les pièces à conviction concernant le mouvement de l'éther est donnée par R. S. Shankland, S. W. McCuskey, F. C. Leone & G. Kuerti, New analysis of the interferometer observations of Dayton C. Miller, *Review of Modern Physics* **27**, pp. 167–178, 1955. Voici un texte plus ancien : H. Witte, *Annalen der Physik* **26**, p. 235, 1908. Cité en page 108.

78 L'histoire du concept du vide peut être compulsée dans le livre de E. Grant, *Much Ado About Nothing*, Cambridge University Press, 1981, et dans l'ample texte de référence d' Edmund T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Volume I : *The Classical Theories*, Volume II : *The Modern Theories*, Tomash Publishers, American Institute of Physics 1951, 1987. Cité aux pages 108 et 109.

Les divers *modèles de l'éther* – les rouages, les tubes, les tourbillons – proposés au cours du dix-neuvième siècle furent abandonnés pour différentes raisons. Puisque plusieurs modèles avaient coutume d'expliquer les champs électrique et magnétique comme un mouvement de certaines entités, on en avait conclu que la vitesse de la lumière dépendrait des champs électrique ou magnétique. Un type de champ était généralement décrit par un mouvement rectiligne de ces entités, l'autre par un mouvement rotatoire ou entortillé, ces deux attributions étant possibles. En conséquence, l'éther doit être un fluide quelque peu étrange qui s'écoule parfaitement, mais qui résiste à la rotation d'éléments de volume, comme le déduisit McCullogh en 1839. Cependant, les expériences montrent que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de l'intensité du champ électromagnétique. Les tourbillons furent abandonnés parce que ceux du monde réel se révélèrent instables. Tous ces modèles rendirent leur dernier souffle lorsqu'ils refusèrent de se plier aux exigences imposées par la relativité restreinte.

79 Cela est arrivé à Giovanni Bellini (v. 1430–1516), le grand peintre vénitien de la Renaissance, qui consigna même cette expérience par écrit, produisant ainsi l'une des plus grandes « bévues » de tous les temps. Si vous prenez une photographie de cet effet avec un appareil contrôlable à distance, vous pouvez prouver que votre appareil photo est également sacré. Cité en page 110.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

80 S. R. Wilk, How retroreflectors really work, *Optics & Photonics News,* pp. 6–7, décembre 1993. Cité en page 110.

81 W. H. Ehrenstein & B. Lingelbach, Das Hermann–Gitter, *Physik in unserer Zeit* **6**, pp. 263–268, 2002. Ce journal montre aussi une variante de couleur différente de ces grilles. Cité en page 110.

82 Ce mythe concernant la sensibilité de l'œil est minutieusement démenti par B. H. Soffer & D. K. Lynch, Some paradoxes, errors, and resolutions concerning the spectral optimization of human vision, *American Journal of Physics* **67**, pp. 946–953, 1999. Cité en page 113.

83 David R. Williams, Supernormal Vision, *Science News* **152**, pp. 312–313, 15 novembre 1997. Consultez aussi www.cvs.rochester.edu/williamslab/p_williams.html ainsi que les photographies sur www.cvs.rochester.edu/people/~aroorda/ao_research.html de l'intérieur des yeux des êtres vivants. Leur dernière publication est A. Roorda, A. Metha, P. Lennie & D. R. Williams, Packing arrangement of the three cone classes in the primate retina, *Vision Research* **41**, pp. 1291–1306, 2001. Cité en page 114.

84 S. W. Hell, Strategy for far-field optical imaging and writing without diffraction limit, *Physics Letters A* **326**, pp. 140–145, 2004, lisez aussi V. Westphal & S. W. Hell, Nanoscale resolution in the focal plane of an optical microscope, *Physical Review Letters* **94**, p. 143903, 2005, et V. Westphal, J. Seeger, T. Salditt & S. W. Hell, Stimulated emission depletion microscopy on lithographic microstructures, *Journal of Physics B* **38**, pp. S695–S705, 2005. Cité en page 118.

85 A. D. Erlykin & A. W. Wolfendale, The origin of cosmic rays, *European Journal of Physics* **20**, pp. 409–418, 1999, Cité en page 125.

86 D. Singleton, Electromagnetic angular momentum and quantum mechanics, *American Journal of Physics* **66**, pp. 697–701, 1998, Cité en page 69.

87 A. Yazdani, D. M. Eigler & N. D. Lang, Off-resonance conduction through atomic wires, *Science* **272**, pp. 1921–1924, 28 juin 1996. Pour l'aluminium, l'or, le plomb, le niobium, ainsi que l'influence des propriétés chimiques, lisez Elke Scheer, The signature of chemical valence in the electric conduction through a single-atom contact, *Nature* **394**, pp. 154–157, 9 juillet 1998. Cité en page 51.

88 Lisez L. Kowalski, A myth about capacitors in series, *The Physics Teacher* **26**, pp. 286–287, 1988, et A. P. French, Are the textbook writers wrong about capacitors ?, *The Physics Teacher* **31**, pp. 156–159, 1993. Cité en page 51.

89 Ce problème a été suggéré par Vladimir Surdin. Cité en page 121.

90 Consultez par exemple J. M. Aguirregabiria, A. Hernandez & M. Rivas, Velocity fields inside a conducting sphere near a slowly moving charge, *American Journal of Physics* **62**, pp. 462–466, 1994. Cité en page 146.

91 Philip Cohen, Open wide, this won't hurt a bit, *New Scientist* p. 5, 3 février 1996. Cité en page 147.

92 Une telle revendication fut implicitement faite par D. Mugnai, A. Ranfagni & R. Ruggieri, Observation of superluminal behaviors in wave propagation, *Physical Review Letters* **84**, p. 4830, 2000. Une excellente explication et une réfutation furent apportées par W. A. Rodrigues, D. S. Thober & A. L. Xavier, Causal explanation for observed superluminal behavior of microwave propagation in free space, arxiv.org/abs/physics/0012032. Cité en page 122.

93 J. E. Avron, E. Berg, D. Goldsmith & A. Gordon, Is the number of photons a classical invariant ?, *European Journal of Physics* **20**, pp. 153–159, 1999. Cité en page 148.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

94 Si vous voulez mieux vous rendre compte de la manière dont le monde apparaît aux différents types de daltoniens, jetez un œil sur les pages Web webexhibits.org/causesofcolor/2.html ou www.vischeck.com/examples. Cité en page 122.

95 Si vous voulez en lire plus sur ce sujet, consultez l'ouvrage classique de Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering : the Design of Optical Systems*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2000. Cité aux pages 93 et 123.

96 Les spécialistes mondiaux de la physique de l'éclair sont russes, pour la plupart. En voici deux excellents ouvrages : Vladimir A. Rakov & Martin A. Uman, *Lightning : Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003, et Eduard M. Bazelyon & Yuri P. Raizer, *Lightning Physics and Lightning Protection*, Institute of Physics Publishing, 2000. Cité en page 127.

97 Concernant la longue vie passionnée qui anima Luke Howard, lisez le livre de Richard Hamblyn, *The Invention of Clouds*, Macmillan 2001. Cité en page 127.

98 J. Latham, The electrification of thunderstorms, *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society* **107**, pp. 277–289, 1981. Pour un tour d'horizon plus récent et plus large, consultez Earle R. Williams, The tripole structure of thunderstorms, *Journal of Geophysical Research* **94**, pp. 13151–13167, 1989. Lisez également le livre de la National Research Council Staff, *The Earth's Electrical Environment*, Studies in Geophysics, National Academy Press, 1986. Cité en page 127.

99 A. V. Gurevich & K. P. Zybin, Runaway breakdown and the mysteries of lightning, *Physics Today* **58**, pp. 37–43, mai 2005. Cité en page 127.

100 Pour en savoir plus sur les courants atmosphériques, jetez un coup d'œil au travail de vulgarisation de l'étude américaine mené par E. A. Bering, A. A. Few & J. R. Benbrook, The global electric circuit, *Physics Today* **51**, pp. 24–30, octobre 1998, ou la synthèse plus technique de E. Bering, *Reviews of Geophysics* (supplement) **33**, p. 845, 1995. Cité en page 129.

101 L'utilisation des résonances de Schumann dans le condensateur que représente l'ionosphère terrestre, pour ce domaine de recherche, est expliquée dans K. Schlegel & M. Füllerkrug, Weltweite Ortung von Blitzen, *Physik in unserer Zeit* **33**, pp. 257–261, 2002. Cité en page 129.

102 J. R. Dwyer, M. A. Uman, H. K. Rassoul, M. Al-Dayeh, E. L. Caraway, J. Jerauld, V. A. Rakov, D. M. Jordan, K. J. Rambo, V. Corbin & B. Wright, Energetic radiation produced by rocket-triggered lightning, *Science* **299**, pp. 694–697, 2003. Cité en page 129.

103 J. R. Dwyer, A fundamental limit on electric fields in air, *Geophysical Research Letters* **30**, p. 2055, 2003. Cité en page 129.

104 B. M. Smirnov, Physics of ball lightning, *Physics Reports* **224**, pp. 151–236, 1993. Lisez aussi D. Finkelstein & J. Rubinstein, Ball lightning, *Physical Review* **135**, pp. 390–396, 1964. Une simple recherche sur la Toile mondiale vous permet d'en savoir plus sur les légendes et les croyances colportées sur ce sujet. Cité en page 130.

105 G. D. Shabanov, The optical properties of long-lived luminous formations, *Technical Physics Letters* **28**, pp. 164–166, 2002, A. I. Egorov & S. I. Stepanov, Long-lived plasmoids produced in humid air as analogues of ball lightning, *Technical Physics* **47**, pp. 1584–1586, 2002, A. E. Egorov, S. I. Stepanov & G. D. Shabanov, Laboratory demonstration of ball lightning, *Physics Uspekhi* **47**, pp. 99–101, 2004, et G. D. Shabanov & B. Yu. Sokolovskii, Macroscopic separation of charges in a pulsed electric discharge, *Plasma Physics Reports* **31**, pp. 512–518, 2005. (Ce sont tous des traductions anglaises

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

d'articles antérieurs en langue russe.) Consultez les sites Web biod.pnpi.spb.ru/pages_ru/Stepanov/index.html, stealthtank.narod.ru, balllightning.narod.ru/hvewd.html et www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/presse/pi/05_06_pi.html, pour avoir plus de précisions et voir des films spectaculaires. Cité en page 131.

106 G. Silva Paiva, A. C. Pavão, E. Alpes de Vasconcelos, O. Mendes & da Silva, Production of ball-lightning-like luminous balls by electrical discharges in silicon, *Physics Review Letters* **98**, p. 048501, 2007. Cité en page 131.

107 Lisez la synthèse récente de S. Parrott, arxiv.org/abs/gr-qc/9711027. Lisez aussi T. A. Abbott & D. J. Griffiths, Acceleration without radiation, *American Journal of Physics* **53**, pp. 1203–1211, 1985. Consultez également A. Kovetz & G. E. Tauber, Radiation from an accelerated charge and the principle of equivalence, *American Journal of Physics* **37**, pp. 382–385, 1969. Cité en page 131.

108 C. de Almeida & A. Saa, The radiation of a uniformly accelerated charge is beyond the horizon : a simple derivation, *American Journal of Physics* **74**, pp. 154–158, 2006. Cité en page 131.

109 J. Zhang, X. D. Song, Y. C. Li, P. G. Richards, X. L. Sun & F. Waldhauser, Inner core differential motion confirmed by earthquake doublet waveform doublets, *Science* **309**, pp. 1357–1360, 2005. Cité en page 133.

110 On déduit cela à partir des mesures de $g - 2$, comme l'a expliqué le Prix Nobel suivant lors de son discours : Hans Dehmelt, Experiments with an isolated subatomic particle at rest, *Reviews of Modern Physics* **62**, pp. 525–530, 1990, et dans Hans Dehmelt, Is the electron a composite particle ?, *Hyperfine Interactions* **81**, pp. 1–3, 1993. Cité en page 133.

111 L'article qui suit en constitue une introduction succincte et excellente, F. Rohrlich, The self-force and radiation reaction, *American Journal of Physics* **68**, pp. 1109–1112, 2000. Cité en page 134.

112 C. G. Tsagas, Magnetic tension and the geometry of the universe, *Physical Review Letters* **86**, pp. 5421–5424, 2001. Un tour d'horizon du sujet en est donné dans C. G. Tsagas, Geometrical aspects of cosmic magnetic fields, arxiv.org/abs/gr-qc/0112077. Cité en page 134.

113 Une excellente synthèse en est fournie par E. H. Brandt, Levitation in Physics, *Science* **243**, pp. 349–355, 1989. Cité aux pages 134 et 137.

114 Lisez l'article de R. Tuckermann, S. Bauerecker & B. Neidhart, Levitation in Ultraschallfeldern – Schwebende Tröpfchen, *Physik in unserer Zeit* **32**, pp. 69–75, février 2001. Des gouttes de liquide de 1 g ont été mises en lévitation de cette manière. Cité en page 135.

115 F. C. Moon & P. Z. Chang, *Superconducting Levitation – Applications to Bearings and Magnetic Transportation*, Wiley & Sons, 1994. Cité aux pages 135 et 136.

116 W. T. Scott, Who was Earnshaw ?, *American Journal of Physics* **27**, pp. 418–419, 1959. Cité en page 135.

117 L'astuce consiste à montrer que $\operatorname{div} \boldsymbol{E} = 0$, $\operatorname{curl} \boldsymbol{E} = 0$, donc $E\nabla^2 E = 0$ et, à partir de cela, $\nabla^2 E^2 \geqslant 0$. Il n'y a donc pas de maxima du champ électrique local en l'absence de charges libres. La même démonstration s'applique pour le champ magnétique. Cependant, des corps dotés de constantes diélectriques *inférieures* à leur environnement *peuvent* être mis en lévitation dans des champs électriques statiques. Les bulles de gaz dans des liquides en sont un exemple, comme l'ont montré T. B. Jones & G. W. Bliss, Bubble dielectrophoresis, *Journal of Applied Physics* **48**, pp. 1412–1417, 1977. Cité en page 135.

118 Néanmoins, il est possible de faire léviter des aimants si nous utilisons une combinaison de matériaux diamagnétiques. Lisez A. K. Geim, M. D. Simon, M. I. Boamfa &

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L. O. Heflinger, Magnet levitation at your fingertips, *Nature* **400**, pp. 323–324, 1999. Cité en page 136.

119 Les premières photographies d'un unique *ion* furent montrées dans W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. E. Toschek & H. Dehmelt, Localized visible Ba^+ mono-ion oscillator, *Physical Review A* **22**, pp. 1137–1140, 1980. Lisez aussi D. J. Wineland & W. M. Itano, *Physics Letters A* **82**, p. 75, 1981, ainsi que F. Dietrich & H. Walter, *Physical Review Letters* **58**, p. 203, 1987.

Pour des *atomes* seuls, regardez les photographies données dans Z. Hu & H. J. Kimble, *Optics Letters* **1**, p. 1888, 1994, F. Ruschewitz, D. Bettermann, J. L. Peng & W. Ertmer, *Europhysics Letters* **34**, p. 651, 1996, D. Haubrich, H. Schadwinkel, F. Strauch, B. Ueberholz, R. Wynands & D. Meschede, *Europhysics Letters* **34**, p. 663, 1996. Cité en page 136.

120 Lisez par exemple Mark Buchanan, And God said...let there be levitating strawberries, flying frogs and humans that hover over Seattle, *New Scientist* pp. 42–43, 26 juillet 1997, ou C. Wu, Floating frogs, *Science News* **152**, pp. 632–363, 6 décembre 1997, et C. Wu, Molecular magnetism takes off, *Physics World*, avril 1997, p. 28. Les expériences d'Andre Geim, Jan Kees Maan, Humberto Carmona et Peter Main furent rendues publiques par P. Rodgers, *Physics World* **10**, p. 28, 1997. Certains de ces résultats se trouvent dans M. V. Berry & A. K. Geim, Of flying frogs and levitrons, *European Journal of Physics* **18**, pp. 307–313, 1997. Consultez également leur site Web www.hfml.science.ru.nl/levitate.html. Cité en page 137.

121 Ce célèbre jouet, baptisé « Levitron », permet de mettre en œuvre la lévitation sans utiliser une quelconque source d'énergie. Il *ne* fut *pas* inventé par Bill Hones de la Fascination Toys & Gifts à Seattle, comme l'explique le site Web www.levitron.com. Ce joujou est analysé par Ron Edge, Levitation using only permanent magnets, *Physics Teacher* **33**, p. 252, avril 1995. Il est également discuté par M. V. Berry, The Levitron^{TM} : an adiabatic trap for spins, *Proceedings of the Royal Society A* **452**, pp. 1207–1220, 1996 (lors de la période de notoriété de Berry), ainsi que par M. D. Simon, L. O. Heflinger & S. L. Ridgeway, Spin stabilized magnetic levitation, *American Journal of Physics* **65**, pp. 286–92, 1997, et par T. B. Jones, M. Washizu & R. Gans, Simple theory for the Levitron, *Journal of Applied Physics* **82**, pp. 883–889, 1997. Cité en page 137.

122 Le tour du foret et la conception d'un Levitron sont décrits dans la magnifique retranscription du cours de Josef Zweck, *Physik im Alltag*, Skript zur Vorlesung im WS 1999/2000 der Universität Regensburg. Cité en page 137.

123 La prédiction concernant la lévitation quantifiée est due à Stephen B. Haley, Length quantization in levitation of magnetic microparticles by a mesoscopic superconducting ring, *Physical Review Letters* **74**, pp. 3261–3264, 1995. Ce sujet est discuté de façon plus détaillée dans Stephen B. Haley, Magnetic levitation, suspension, and superconductivity : macroscopic and mesoscopic, *Physical Review B* **53**, p. 3506, 1996, et avec un tout autre ordre de grandeur dans Stephen B. Haley, Quantized levitation of superconducting multiple-ring systems, *Physical Review B* **53**, p. 3497, 1996, ainsi que Stephen B. Haley, Quantized levitation by multiply-connected superconductors, LT-21 Proceedings, in *Czechoslovak Journal of Physics* **46**, p. 2331, 1996. En 1998, il n'y avait toujours pas de confirmation expérimentale (Stephen Haley, communication privée). Cité en page 137.

124 Des descriptions détaillées d'un grand nombre de ces effets peuvent être compulsées dans l'excellente synthèse éditée par Manfred von Ardenne, Gerhard Musiol & Siegfried Reball, *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*, Harri Deutsch, 2004. Cité en page 138.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

125 R. Buddakian, K. Weninger, R. A. Hiller & Seth J. Putterman, Picosecond discharges and stick–slip friction at a moving meniscus of mercury in glass, *Nature* **391**, pp. 266–268, 15 janvier 1998. Lisez aussi *Science News* **153**, p. 53, 24 janvier 1998. Cité en page 138.

126 Henk Swagten & Reinder Coehoorn, Magnetische tunneljuncties, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **64**, pp. 279–283, novembre 1998. Cité en page 139.

127 H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno & K. Ohtani, Electric-field control of ferromagnetism, *Nature* **408**, pp. 944–946, 21-28 décembre 2000. Cité en page 139.

128 Cet effet fut découvert par Geert Rikken, Bart van Tiggelen & Anja Sparenberg, Lichtverstrooiing in een magneetveld, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **63**, pp. 67–70, mars 1998. Cité en page 140.

129 Vitalij Pecharsky & Karl A. Gschneidner, Giant magnetocaloric effect in Gd5(Si2Ge2), *Physical Review Letters* **78**, pp. 4494–4497, 1995, et, par les mêmes auteurs, Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~20 to ~2990 K, *Applied Physics Letters* **70**, p. 3299, 1997. Cité en page 140.

130 J. Weissmüller, R. N. Viswanath, D. Kramer, P. Zimmer, R. Würschum & H. Gleiter, Charge-induced reversible strain in a metal, *Science* **300**, pp. 312–315, 11 avril 2003. Cité en page 141.

131 A. Ajdari, Electro-osmosis on inhomogeneously charged surfaces, *Physical Review Letters* **75**, pp. 755–758, 1995. Cité en page 141.

132 M. J. Aitken, *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, 1985. Cependant, la précision de cette méthode est bien plus mauvaise que la datation au C14, comme l'indique H. Huppertz, *Thermolumineszenzdatierung : eine methodologische Analyse aufgrund gesicherter Befunde*, Peter Lang Verlag, 2000. Cité en page 143.

133 Cet effet fut révélé par J. N. Huiberts, R. Griessen, J. H. Rector, R. J. Wijngarden, J. P. Dekker, D. G. de Groot & N. J. Koeman, Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties, *Nature* **380**, pp. 231–234, 1996. Une bonne introduction en est donnée dans R. Griessen, Schaltbare Spiegel aus Metallhydriden, *Physikalische Blätter* **53**, pp. 1207–1209, 1997. Cité en page 144.

134 Consultez n'importe quel ouvrage sur la thermostatique, tel que Linda Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Cité en page 145.

135 Le Soleil émet environ $4 \cdot 10^{26}$ W à partir de sa masse de $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit à peu près 0,2 mW/kg. Une personne ayant une masse moyenne de 75 kg émet environ 100 W (vous pouvez vérifier cela au lit la nuit), c'est-à-dire à peu près 500 fois plus. Cité en page 146.

136 Consultez son site Web www.cie.co.at/index_ie.html. Cité en page 118.

137 P. D. Jones, M. New, D. E. Parker, S. Martin & I. G. Rigor, Surface air temperature and its changes over the past 150 years, *Reviews of Geophysics* **37**, pp. 173–199, mai 1999. Cité en page 119.

138 Des images d'objets portés au rouge dans un four brûlant et à température ambiante sont montrées dans C. H. Bennett, Demons, engines and the second law, *Scientific American* **255**, pp. 108–117, novembre 1987. Cité en page 120.

139 Bill McGuire, *A Guide to the End of the World : Everything You Never Wanted to Know*, Oxford University Press, 2002. Sur les catastrophes du passé, lisez l'introduction donnée par Tony Hallam, *Catastrophes and Lesser Calamities – the Causes of Mass Extinctions*, Oxford University Press, 2004. Cité en page 154.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

140 Lisez par exemple le magnifique ouvrage de Stephen C. Stearns & Rolf F. Hoekstra, *Evolution : An Introduction*, Oxford University Press, 2000. Concernant le récit fascinant de l'évolution, pour des non-spécialistes, consultez Richard Fortey, *Life – An Unauthorized Biography*, Harper Collins, 1997, et aussi Menno Schilthuizen, *Frogs, Flies & Dandelions – the Making of Species*, Oxford University Press, 2001. Consultez aussi Stephen J. Gould, *Le Pouce du panda*, Grasset, 1982, un des multiples ouvrages intéressants et instructifs sur la biologie de l'évolution, rédigé par le meilleur auteur dans ce domaine. Un aperçu didactique sur les résultats de l'évolution, dont l'arbre généalogique aux nombreuses ramifications qu'elle a engendré, en est donné sur le site phylogeny.arizona.edu/tree. Concernant les résultats de l'évolution des êtres humains, lisez le texte pertinent de K. Kusch & S. Kusch, *Der Mensch in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 2nd edn., 2000. L'œuvre historique de Charles Darwin, *L'Origine des espèces*, peut être consultée sur le Web, par exemple sur les sites abu.cnam.fr/cgi-bin/go?especel, entisoft.earthlink.net/origspec.htm et sur www.darwin-online.org.uk. Cité en page 160.

141 Une description élémentaire en est donnée par Malcolm Ross Macdonald, *The Origin of Johnny*, Jonathan Cape, 1976. Cité en page 160.

142 Richard Bandler, *Using Your Brain for a Change*, Real People Press, p. 18, 1985. Cité en page 161.

143 Les spécialistes ne sont pas d'accord sur la datation précise de cette expérience. Certains disent que seule la naissance elle-même constitue cet instant. Toutefois, il existe plusieurs méthodes usuelles qui permettent de faire ressurgir des souvenirs antérieurs, même avant la naissance. L'une d'entre elles est décrite et employée par J. K. Stettbacher, *Making Sense of Suffering*, Penguin, New York, 1991, traduit de l'original allemand. Des exemples encore plus impressionnants sont cités par N. J. Mayer, *Der Kainkomplex – neue Wege der systemischen Familientherapie*, Integral Verlag, 1998. Cité en page 161.

144 Sanjida O'Connell, *Mindreading – How We Learn to Love and Lie*, Arrow, 1998. Ce livre intéressant décrit l'importance du mensonge dans le développement d'un être humain, et explique les troubles du comportement qu'ont ceux qui ne peuvent pas lire dans les pensées des autres et qui ne peuvent donc pas mentir, tels que les autistes. Cité aux pages 162 et 201.

145 L'approche consistant à décrire les observations comme des parties en relation est dénommée le structuralisme. Le point de départ de ce mouvement fut donné par le *Cours de linguistique générale* de de Saussure (lisez la note de la page 174). De nombreux penseurs ont tenté d'utiliser la même approche en philosophie, en mythologie et dans la théorie de la littérature, quoique ce fût avec un succès mitigé. Un aperçu de la réussite (modeste) du structuralisme en linguistique et de ses échecs dans d'autres domaines est donné par L. Jackson, *The Poverty of Structuralism : Literature and Structuralist Theory*, Longman, 1991. L'auteur argumente que lorsque nous réduisons les systèmes aux seules interactions, nous négligeons le contenu et les propriétés spécifiques aux éléments du système, et cette approche ne permet pas d'avoir une compréhension globale du système considéré. Cité en page 162.

146 Pour une vision des aptitudes mentales, distincte de celle de Piaget (décrite à la page 163), un auteur actuellement très en vogue est le psychologue expérimentateur soviétique Lev Vigotsky, dont les idées anticonformistes et la vie tumultueuse sont décrites, par exemple, dans Lev Vigotsky, *Mind in Society*, Harvard University Press, 1978, ou dans René van der Veer & Jaan Valsiner, *Understanding Vigotsky : a Quest for Synthesis*, Blackwell Publishers, 1994. Des ressources plus profondes peuvent être trouvées dans le vaste travail de René van der Veer & Jaan Valsinger, *The Vigotsky Reader*, Blackwell, 1994. Cité en page 163.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

147 Le magnifique ouvrage de Bruno Bettelheim, The Uses of Enchantment : the Meaning and Importance of Fairy Tales, Knopf, 1976, est une source, dans une certaine mesure non conventionnelle, pour obtenir plus de précisions. Cité en page 163.

148 Le livre de Manfred Spitzer, *Lernen – Gehirnforschung und Schule des Lebens*, Elsevier, 2007, en est une introduction élémentaire. Cité en page 165.

149 Cité dans V. Harlen, R. Rappmann & P. Schata, *Soziale Plastik – Materialien zu Joseph Beuys*, Achberger Verlag, 1984, p. 61. Cité en page 165.

150 Les problèmes qui surgissent lorsque nous perdons l'aptitude à classifier ou à mémoriser sont développés dans le beau livre du neurologue Oliver Sacks, *L'Homme qui prenait sa femme pour un chapeau et autres récits cliniques*, Seuil, 1992, qui énumère de nombreux cas d'étude qu'il a rencontrés au cours de sa carrière. Des cas plus surprenants sont collectés dans son ouvrage tout aussi impressionnant *Un Anthropologue sur Mars*, Seuil, 1996.

Lisez aussi le magnifique ouvrage de Donald D. Hoffman, *Visual Intelligence – How We Create What We See*, W.W. Norton & Co., 1998, et le site Web qui lui est associé www.cogsci.uci.edu/personnel/hoffman/hoffman.html. Cité aux pages 165 et 168.

151 Pour une introduction passionnante sur les relations entre le langage et le cerveau selon un point de vue chomskien, lisez l'ouvrage à succès de Steven Pinker, *The Language Instinct – How the Mind Creates Language*, Harper Perennial, 1994. La phrase sur l'idée verte est débattue dans un chapitre de ce livre. Cité aux pages 165, 207 et 226.

152 Voici une introduction à la neurologie : Joseph Ledoux, *Synaptic Self : How Our Brains Become Who We Are*, Viking Press, 2002. Cité en page 166.

153 Un tour d'horizon de l'état de la recherche sur l'origine de la bipédie est exposé par B. Wood, Four legs good, two legs better, *Nature* **363**, pp. 587–588, 17 juin 1983. Cité en page 166.

154 La référence James A. Anderson, *An Introduction to Neural Networks*, MIT Press, 1995, est une excellente introduction à l'étude des classificateurs. Une introduction à l'informatique théorique en est donnée dans J. Glenn Brookshear, *Computer Science, An Overview*, 6th edition, Addison Wesley, 2000, ou dans Rick Decker & Stuart Hirshfield, *The Analytical Engine : An Introduction to Computer Science Using the Internet*, Brooks/Cole Publishers, 1998. Cité en page 166.

155 Vous trouverez plus d'informations sur les connexions entre l'entropie et les ordinateurs dans l'article de référence de R. Landauer, Irreversibility and heat generation in the computing process, *IBM Journal of Research and Development* **5**, pp. 183–191, 1961, et dans C. H. Bennett & R. Landauer, The fundamental physical limits of computation, *Scientific American* **253**, pp. 48–56, 1985. Cité en page 170.

156 W. H. Zurek, Thermodynamic cost of computation, algorithmic complexity and the information metric, *Nature* **341**, pp. 119–124, 14 août 1989. Cité en page 170.

157 L. Szilard, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik* **53**, p. 840, 1929. Ce classique peut également être consulté en traduction anglaise dans les œuvres choisies de Leo Szilard. Cité en page 170.

158 J. J. Hopfield, *Nature* **376**, pp. 33–36, 1995. Cet article rédigé par l'un des pères fondateurs de ce domaine expose une possibilité selon laquelle la *synchronisation* des signaux nerveux pourrait également transporter de l'information, au lieu de la fréquence des impulsions généralement présumée. Cité en page 170.

159 Les propriétés détaillées de la forme des impulsions des neurones sont merveilleusement décrites dans l'article de M. Mahowald & R. Douglas, A silicon neuron, *Nature* **354**,

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

pp. 515–518, 19-26 décembre 1991, dans lequel ils montrent comment reproduire le comportement électrique d'un neurone en utilisant un circuit sur silicium. Cité en page 170.

160 A. Mechelli, J. T. Crinion, U. Noppeney, J. O'Doberty, J. Ashburner, R. S. Frackowiak & C. J. Price, Neurolinguistics : structural plasticity in the bilingual brain, *Nature* **431**, p. 757, 2004. Cité en page 171.

161 La discussion de savoir si le cerveau est ou n'est pas supérieur à un ordinateur est magnifiquement résumée par G. Vollmer, Algorithmen, Gehirne, Computer – Was sie können und was sie nicht können, Teil I und Teil II, *Naturwissenschaften* **78**, p. 481, 1991, et **78**, pp. 533–542, 1991. Cité en page 172.

162 Cependant, le dictionnaire disponible le plus vaste est celui de la langue hollandaise, avec les 40 volumes du Wordenboek der Nederlandsche Taal, qui sortirent entre 1864 et 1998. Il possède environ 400 000 entrées. Cité en page 176.

163 Cette liste ainsi que la remarque sur la découverte des concepts proviennent d'une communication personnelle d'Anna Wierzbicka. Une liste plus longue est publiée dans son livre *Semantics, Primes and Universals*, Oxford University Press, 1996. Cité aux pages 176 et 198.

164 W. S. Hatcher, *Foundations of Mathematics*, W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1968. Il y a aussi l'article de P. J. Cohen & R. Hersch, Non-Cantorian set theory, *Scientific American* **217**, pp. 104–116, 1967. Cohen fut le mathématicien qui démontra en 1963 que la négation de l'hypothèse du continu pouvait être ajoutée aux axiomes de la théorie des ensembles tout en produisant encore une théorie cohérente, il qualifia ces ensembles de *non cantoriens*. Cité en page 182.

165 Lisez l'article admirable de I. Stewart, Fair shares for all, *New Scientist*, pp. 42–46, 17 juin 1995. Cité en page 182.

166 La preuve de l'indépendance de l'hypothèse du continu se fait en deux temps. Premièrement, Kurt Gödel démontra en 1940 qu'un axiome peut logiquement être ajouté à la théorie des ensembles ZFC de telle sorte que l'hypothèse du continu soit correcte. Puis, en 1963, Paul Cohen montra qu'un axiome peut logiquement être ajouté à la théorie des ensembles ZFC de telle sorte que l'hypothèse du continu soit fausse. Cité en page 184.

167 Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, Toronto, 1983. Cité en page 185.

168 Cette division générale des mathématiques est très bien expliquée dans l'ouvrage de Pierre Basieux, *Die Architektur der Mathematik – Denken in Strukturen*, Rororo, 2000. Cité en page 186.

169 Ce problème est traité dans Thomas d'Aquin, *Somme théologique*, à la question 52 de la première partie. Le texte complet, de plusieurs milliers de pages, peut être compulsé sur les sites Web docteurangelique.free.fr (en français) www.newadvent.org (en anglais). Nous y reviendrons dans la partie sur la théorie quantique, dans la section sur le principe d'exclusion de Pauli. Il semble que cette question tout entière ait ressurgi dans Pierre Lombard, *Liber Sententiarum* v. 1150. Cité en page 187.

Page ??

170 B. C. Gallivan, How to fold paper in half twelve times : an « impossible challenge » solved and explained, Historical Society of Pomona Valley, 2002, que l'on trouve également sur www.osb.net/Pomona/12times.htm. Lisez aussi www.sciencenews.org/20040124/mathtrek.asp. Cité en page 187.

171 I. Stewart, Daisy, daisy, give me your answer, do, *Scientific American*, pp. 76–79, janvier 1995. Cet article instructif explique comment la croissance des plantes conduit généralement à des fleurs dont le nombre de pétales est tiré de la suite de Fibonacci 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, etc. (La figure située à la page 171 en est un exemple.) Les écarts à cette

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

règle idéale sont également expliqués. Le travail initiateur correspond aux deux articles de S. Douady & Y. Couder, La physique des spirales végétales, *La Recherche* **24**, pp. 26–36, 1993, et Phyllotaxis as a self-organized growth process, dans *Growth Patterns in Physical Sciences and Biology*, édité par J.M. Garcia-Ruiz & al., Plenum Press, 1993. Cité en page 187.

172 H. Davson, *The Eye*, Academic Press, 1962. Cité en page 188.

173 Consultez le site Web akbar.marlboro.edu/~mahoney/cube/NxN.txt. Cité en page 188.

174 Une introduction aux nombres surréels est donnée par l'article de Polly Shulman, Infinity plus one, and other surreal numbers, *Discover*, pp. 99–105, décembre 1995. Il y a aussi le texte de D. Knuth, *Surreal Numbers : How two ex-Students Turned on to Pure Mathematics and Found Total Happiness*, Addison Wesley, 1974, ou www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/sn.html. Les références généralement citées sur ce sujet incluent John H. Conway, *On Numbers and Games*, Academic Press, 1976, E. R. Berlekamp, J. H. Conway & R. K. Guy, *Winning Ways for Your Mathematical Plays, Volume I : Games in General*, Academic Press, 1982, et H. Gonshor, *An Introduction to Surreal Numbers*, Cambridge University Press, 1986. Cité aux pages 189 et 190.

175 Ce magnifique problème est traité par Ian Stewart, A bundling fool beats the wrap, *Scientific American,* pp. 109–111, juin 1993. En quatre dimensions, nous savons que la solution se situe quelque part entre 50 000 et 100 000, tandis qu'on conjecture que la réponse dans la cinquième dimension est « jamais ». Cité en page 191.

176 A. Pais, *Niels Bohr's Times : in Physics, Philosophy and Polity*, Oxford University Press, 1991, page 176. Cité en page 191.

177 Eugene Wigner, *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, 1962. Cité en page 191.

178 Alfred Tarski, *Introduction to Modern Logic*, Dover, 1946. Lisez aussi le célèbre livre pour enfants du mathématicien et photographe Lewis Carroll, *Alice au pays des merveilles*. Cité en page 193.

179 Göran Wikell, The layout of digits on pushbutton telephones – a review of the literature, *Tele* **34**, pp. 34–42, 1982. Cité en page 194.

180 Un tour d'horizon clair de la philosophie des sciences, souvent appelée *épistémologie*, sans détails superflus, est donné par Robert Blanché, L'Épistémologie, Presses Universitaires de France, 1972. Cité en page 196.

181 Sur les différents aspects de l'aptitude des propositions générales à être réfutées, il est d'usage de citer le travail de l'épistémologue Karl Popper (1902–1994), plus particulièrement son long livre harassant *Logik der Forschung*, publié pour la première fois en 1934. La raison de cette lassitude est que le travail de Popper est simplement une remise au goût du jour des idées de Pierre Duhem. Cité en page 202.

182 Pour une bonne méthode permettant de faire liquéfier du sang, lisez L. Garlaschelli, F. Ramaccini & S. Della Scala, Working bloody miracles, *Nature* **353**, p. 507, 1991. Le *Grand Dictionnaire universel du XIXe siècle*, de Pierre Larousse, contient également une recette, qui fut à nouveau montrée au public dans les années 1980 par Henri Broch. L'ouvrage classique de Harry Houdini, *Miracle Mongers and their Methods*, Prometheus Books, Buffalo, 1981, est splendide. L'original, écrit en 1920 par le magicien mondialement célèbre appelé « le Grand Houdini », est également disponible sur le site Web etext.lib.virginia.edu/toc/modeng/public/HouMirM.html. Les statues indiennes qui boivent du lait étaient courantes dans le monde en 1994 et 1995. Concernant les guérisseurs, lisez James Randi, *Flim-flam !*, Prometheus Books, Buffalo, New York, 1987, et l'excellent ou-

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

vrage de HANS CONRAD ZANDER, *Warum ich Jesus nicht leiden kann*, Rowohlt, 1994. Cité en page 203.

183 ROGER PENROSE, *The Road to Reality : A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Jonathan Cape, 2004, p. 378. Cité en page 223.

184 JOHN HORGAN, *The End of Science – Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Broadway Books, 1997, pp. 31–32, et chapitre 2, note 2. Cité aux pages 206 et 223.

185 Lisez le livre de GREGORY J. CHAITIN, *The Limits of Mathematics*, Springer Verlag, 1997, pour avoir une opinion complètement opposée à celle exposée ici. Ce livre est également décrit sur le site Web de l'auteur www.cs.auckland.ac.nz/CDMTCS/chaitin/lm.html, parmi ses autres travaux. Chaitin a consacré la majorité de sa vie aux questions débattues dans cette section, particulièrement sur la calculabilité. Cité en page 207.

186 Lisez le livre de J. BARWISE & J. ETCHEMENDY, *The Liar*, Oxford University Press, New York, 1987. Cité en page 207.

187 Cette définition (proposition 4.11) et de nombreuses autres propositions sur la science se trouvent dans le texte magnifique et célèbre à juste titre de LUDWIG WITTGENSTEIN, *Tractatus logico-philosophicus*, Suhrkamp, 1963. Il fournit un résumé condensé des fondements de la science, de la pensée et du langage dans une collection de phrases hautement structurées et numérotées. Cité aux pages 210 et 216.

188 Lisez M. DRESDEN, The Klopsteg memorial lecture, *American Journal of Physics* **66**, pp. 468–482, 1998. Cité en page 211.

189 Parmi les ouvrages notoires, nous avons par exemple FRIEDRICH KOHLRAUSCH, *Praktische Physik*, Teubner, 24. Auflage, 1996. Cité en page 211.

190 Les résultats sont décrits par exemple dans L. BERGMANN & C. SCHÄFER, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band I, II, III und IV, W. de Gruyter. Cité en page 211.

191 LANDOLT-BÖRNSTEIN, édité par K.-H. HELLWEGE & O. MADELUNG, *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, Neue Serie, Springer Verlag, Berlin, 1984. Cette collection de plus de cent volumes contient toutes les observations importantes faites en physique. Cité en page 211.

192 La source de cette attribution incorrecte se trouve dans le livre de GERHARD SZCZESNY, *Brecht, Leben des Galilei – Dichtung und Wirklichkeit*, Ullstein, Berlin 1966, p. 6. Cette déclaration n'a jamais été faite par Galilée, ce problème a été longuement débattu dans les cercles de spécialistes, par exemple par F. KLEINERT, "Messen was meßbar ist" - Über ein angebliches Galilei-Zitat, *Berichte zur Wissenschaftgeschichte* **11**, p. 221, 1988, ou sur Internet par Peter Jaencke. Cité en page 212.

193 Les livres de MARTIN GARDNER, *Fads and Fallacies*, Dover, 1957, et JAMES RANDI, *Faith Healers*, Prometheus Books, 1989, nous dévoilent les conséquences étranges et parfois dangereuses des croyances. Le prix d'un million de dollars pour la démonstration d'un quelconque effet paranormal ou surnaturel est disponible sur le site Web www.randi.org. Cité en page 217.

194 Consultez la belle collection d'excentriques sur le site Web www.crank.net. Cité en page 217.

195 Par exemple, le point de vue opposé sur l'émergence des propriétés est vigoureusement défendu par P. JENSEN, Particle physics and our everyday world, *Physics Today* pp. 58–59, juillet 1998. Cité en page 218.

196 Lisez la page 133 de la bibliographie de JOHN BOWLBY, *Charles Darwin*, Pimlico, 1991. Cité en page 219.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

197 Une admirable introduction à la philosophie grecque est l'ouvrage de Eduard Zeller, *Outlines of the History of Greek Philosophy*, Dover, 1980, réédition d'un livre publié en 1928. Il donne entre autres un exposé clair de la philosophie de Démocrite et des autres présocratiques. Cité en page 224.

198 Cette célèbre citation se trouve au début du chapitre XI, « The Physical Universe », dans Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge, 1939. Cité en page 224.

199 Giuseppe Fumagalli, *Chi l'ha detto ?*, Hoepli, Milano, 1983. Cité en page 226.

200 Lisez Jean-Paul Dumont, *Les Écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 653, 1991. Cité en page 226.

201 Pour un magnifique texte sur les fractales, lisez la note de la page 44. Cité en page 229.

202 Comme l'a fait remarquer René Descartes. Cité en page 232.

203 La célèbre résonance du carbone ^{12}C fut découverte par Willy Fowler, comme le décrit E. Margaret Burbridge, G. R. Burbridge, W. A. Fowler & F. Hoyle, Synthesis of the elements in stars, *Reviews of Modern Physics* **29**, pp. 547–560, 1957. Cité en page 234.

204 L'épais ouvrage de John D. Barrow & Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986, donne une vaste vue d'ensemble de ce sujet. Ce terme lui-même est dû à Brandon Carter, qui le forgea en 1973 et le présenta lors d'un symposium dédié au 500e anniversaire de Nicolas Copernic. Pour plus de littérature, lisez Yuri I. Balashov, Resource Letter AP-1 : the anthropic principle, *American Journal of Physics* **59**, pp. 1069–1076, 1991. Cité en page 234.

205 Voltaire, *Candide ou l'Optimisme*, 1759. Lisez la note de la page 180. Ce livre est si bon qu'il était encore confisqué par le United States Customs Service en 1930, et le United States Post Office refusa de l'acheminer jusqu'en 1944. Pour plus d'informations, cherchez « banned books online » sur Internet. Cité en page 235.

206 Le nombre d'ouvrages sur la conscience est énorme, les contenus pas toujours intéressants et souvent non fondés sur les faits, comme l'indique Karl R. Popper & John Eccles, *The Self and its Brain – an Argument for Interactionism*, Rutledge, 1993. Cité en page 236.

207 Consultez par exemple l'*Encyclopedia Britannica*, Macropaedia, dans l'entrée sur le comportement animal. Cité en page 237.

208 Une introduction directe et instructive (en allemand) sur l'œuvre et les idées de Joseph Beuys est donnée par Renate Georgi, Joseph Beuys, RAAbits Kunst, Raabe Fachverlag, septembre 1996. Cité en page 237.

209 Deux études, l'une de R.P. Ebstein & al., Dopamine D4 receptor (D4DR) exon III polymorphism associated with human personality trait of novelty seeking, *Nature Genetics* **12**, pp. 78–80, janvier 1996, et une autre étude de J. Benjamin & al., Population and familial association between the D4 dopamine receptor gene and measures of novelty seeking, *Nature Genetics* **12**, pp. 81–84, janvier 1996, révèlent que les individus ayant une forme particulière du gène récepteur dopaminergique D4, ou D4DR, sont plus enclins à la recherche d'innovation que ceux ayant la forme usuelle. Le gène D4DR contrôle la formation des récepteurs dopaminergiques, un messager chimique présent dans le cerveau qui a, pendant un certain temps, été candidat comme substance impliquée dans l'aptitude à la recherche d'innovation. Cité en page 238.

210 Lisez Jacques Hadamard, *The Mathematician's Mind – The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton Science Library, 1996. Pour un point de vue moderne, consultez Pierre-Gilles de Gennes, *Fragile Objects : Soft Matter, Hard Science, and*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

the Thrill of Discovery, Springer, 1996, dans lequel de Gennes critique certains systèmes éducatifs qui insistent beaucoup trop sur les mathématiques, détruisant ainsi la créativité. Cité en page 238.

211 Par exemple, nous avons besoin du courage pour résister à l'envie. Concernant ce sujet lisez le classique de Helmut Schoeck, *Der Neid*, 1966, publié en anglais dans *Envy : A Theory of Social Behavior*, 1969. C'est l'œuvre de référence dans ce domaine. Cité en page 239.

212 Le Système International d'Unités, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités du SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par ce même organisme. Preuve du lent cheminement d'une vieille institution, le BIPM inaugura son site Web en 1998 seulement, il est dorénavant accessible sur www.bipm.fr. Consultez également la page Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, elle présente les biographies des personnes qui ont donné leur nom aux diverses unités employées. Le site de son homologue britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est nettement mieux : il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités du SI. Cité en page 241.

213 La bible dans le domaine de la mesure du temps est représentée par l'œuvre magistrale en deux volumes de J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte-rendu populaire se trouve dans Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes employés dans cette discipline. Sur les mesures de longueur, voir ... Sur les mesures de précision du courant électrique, voir ... Sur les mesures de masse, notamment atomique, voir la page 61. Sur les mesures de haute précision de la température, voir la page 345. Cité en page 242.

214 Les préfixes non officiels furent proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et devraient se généraliser à l'avenir. Cité en page 243.

215 Pour plus d'informations sur les systèmes d'unités électromagnétiques, consultez le livre de référence de John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3ème édition, Wiley, 1998. Cité en page 246.

216 G. J. Stoney, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* **11**, pp. 381–391, 1881. Cité en page 246.

217 D.J. Bird & al., Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies, *Physical Review Letters* **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cité en page 247.

218 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures, *Physical Review Letters* **70**, pp. 2818–2821, 1993. Lisez également son article dans *Scientific American*, janvier 1994. Cité en page 247.

219 G. Charpak & R. L. Garwin, The DARI, *Europhysics News* **33**, pp. 14–17, janvier/février 2002. Cité en page 247.

220 Les valeurs mesurées des quantités physiques et les plages de valeurs qu'elles prennent sont assemblées dans Horst Völz & Peter Ackermann, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Cité en page 248.

221 Lisez par exemple K. Codling & L. J. Frasinski, Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields, *Contemporary Physics* **35**, pp. 243–255, 1994. Cité en page 249.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

222 A. Zeilinger, The Planck stroll, *American Journal of Physics* **58**, p. 103, 1990. Pouvez-vous découvrir un autre exemple similaire ? Cité en page 249.

Défi 284 e

223 L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge à fontaine atomique au césium, avait une précision d'une partie pour 10^{15}. Une précision plus élevée a été prévue comme étant bientôt possible, entre autres par M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, An optical lattice clock, *Nature* **435**, pp. 321–324, 2005. Cité en page 250.

224 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité en page 250.

225 Consultez les informations sur les mésons $D_s^{\pm}$, données par le « particle data group » sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité en page 251.

226 Au sujet de la longue durée de vie du tantale 180, lisez D. Belic & al., Photoactivation of $^{180}Ta^{m}$ and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope, *Physical Review Letters* **83**, pp. 5242–5245, 20 décembre 1999. Cité en page 251.

227 Consultez l'étude donnée par L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, The detection of gravitational waves, *Reports on Progress in Physics* **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cité en page 251.

228 Lisez l'article clair et approfondi de G. E. Stedman, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* **60**, pp. 615–688, 1997. Cité en page 251.

229 D'après une communication privée de Richard Rusby, c'est la valeur de 1997, alors qu'elle était estimée à 99.975°C en 1989, comme l'indiquent Gareth Jones & Richard Rusby, Official : water boils at 99.975°C, *Physics World* **2**, pp. 23–24, septembre 1989, et R. L. Rusby, Ironing out the standard scale, *Nature* **338**, p. 1169, mars 1989. Pour plus d'informations sur les mesures de température, lisez la page 345. Cité en page 251.

230 J. Short, Newton's apples fall from grace, *New Scientist*, **2098**, p. 5, 6 septembre 1997. Vous trouverez plus de détails dans R. G. Keesing, The history of Newton's apple tree, *Contemporary Physics* **39**, pp. 377–391, 1998. Cité en page 252.

231 Ces divers concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, l'ISO 5725, dont la désignation est *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*. Une excellente introduction en est donnée par John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis : the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité en page 253.

232 P. J. Mohr & B. N. Taylor, CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 1998, *Reviews of Modern Physics* **59**, p. 351, 2000. C'est la compilation des constantes résultant d'un ajustement international et recommandée pour l'usage international par le Comité de données pour la Science et la Technologie (CODATA), un membre du Conseil international pour la science, lequel compte également l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) et d'autres organisations. Le site Web de l'UICPA est www.iupac.org. Cité aux pages 253 et 254.

233 Les détails sont fournis dans la célèbre référence astronomique, Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité en page 258.

234 Pour plus d'informations concernant le nombre π, ainsi que d'autres constantes, la page Web oldweb.cecm.sfu.ca/pi/pi.html donne une grande quantité de données et de références. Elle possède également un lien vers la synthèse qui en est faite sur mathworld.wolfram.com/Pi.html et vers de nombreux autres sites sur ce sujet. Voici quelques formules simples sur π :

$$\pi + 3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\,2^n}{\binom{2n}{n}} \tag{92}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

ou l'élégante formule découverte en 1996 par Bailey, Borwein et Plouffe :

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n} \left(\frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6} \right) . \tag{93}$$

Ce site développe aussi les nouvelles méthodes découvertes pour pouvoir calculer des chiffres binaires, choisis au préalable, de π sans avoir à évaluer tous les précédents. En outre, le nombre de chiffres (consécutifs) connus en 1999 était de plus de 1,2 million de millions, tel que le cite *Science News* **162**, p. 255, 14 décembre 2002. Ces méthodes passent avec succès tous les tests aléatoires, comme l'explique le site Web mathworld.wolfram.com/PiDigits.html. Cependant, cette propriété, désignée *normalité*, n'a jamais reçu de démonstration, c'est la plus grande question qui demeure ouverte au sujet de π. Il est probable que la théorie de la dynamique du chaos conduise vers une solution à cette énigme dans les années à venir.

Une autre méthode permettant de calculer π ainsi que d'autres constantes a été découverte et publiée par D. V. Chudnovsky & G. V. Chudnovsky, The computation of classical constants, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* **86**, pp. 8178–8182, 1989. Les frères Chudnowsky avaient mis au point un supercalculateur dans l'appartement de Gregory avec environ 70 000 euros, et détinrent pendant plusieurs années le record du calcul du plus grand nombre de chiffres de π. Ils engagèrent une rude compétition durant plusieurs décennies avec Kanada Yasumasa, qui a battu le record en 2000, en effectuant le calcul sur un supercalculateur de l'industrie. De nouvelles formules pour calculer π sont toujours occasionnellement découvertes.

Pour le calcul de la constante d'Euler γ lisez aussi D. W. DeTemple, A quicker convergence to Euler's constant, *The Mathematical Intelligencer*, pp. 468–470, mai 1993.

Défi 285 r
Défi 286 s

Remarquez que nous en savons peu concernant les propriétés élémentaires de certains nombres, par exemple nous ne savons toujours pas si $\pi + e$ est un nombre rationnel ou pas ! (On pense qu'il ne l'est pas.) Voulez-vous devenir un mathématicien ? Cité en page 259.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS

Challenge 4, page 19: Les gouttes de liquide doivent se détacher de l'écoulement précisément à l'intérieur des électrodes métalliques séparées. Il se trouve toujours une minuscule charge quelque part sur les structures métalliques (due aux rayons cosmiques, au frottement, à une accumulation de charge antérieure, etc.). Dans la Figure 88, cette charge initiale est la charge positive dessinée sur la structure métallique en bas à gauche et en haut à droite. Lorsque les gouttelettes d'eau se forment, elles acquièrent une charge qui est opposée à celle du métal qui se trouve à proximité d'où elles sont produites. Les gouttelettes négatives chutent dans l'autre structure métallique. Par l'intermédiaire de l'accumulation de la charge négative à cet endroit, la charge positive située dans la première structure augmente. Lorsque la charge sur la structure métallique augmente, la séparation de charge dans les gouttelettes est plus efficace. Autrement dit, la formation d'une gouttelette d'eau à l'intérieur des structures métalliques *amplifie* toute charge initiale. Après un certain laps de temps, la valeur de la charge et la tension associée sont si importantes que cela provoque un bang audible (si tout est sec, y compris l'air.) Alors le processus se répète à nouveau. En réalité, un mécanisme de séparation de charge vaguement similaire conduit à l'accumulation de charges dans les nuages puis à l'éclair. Si vous voulez construire un générateur de Kelvin chez vous, jetez un œil sur la page Web de.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Generator, ou recherchez d'autres sites Internet sur ce sujet.

Pour éviter les étincelles dans les réservoirs à essence de ses véhicules, Opel raccorda simplement à la masse le tube métallique situé à l'entrée du réservoir, les ingénieurs avaient omis d'assurer un contact électrique entre le tube et le reste du véhicule.

L'explosion de carburant peut aussi se produire si vous versez de l'essence dans votre voiture avec un récipient en métal. À plusieurs reprises, des voleurs de carburant ont été « punis » par une explosion déclenchée par de l'électricité statique, lorsqu'ils ont tenté de verser le carburant volé dans leur propre véhicule.

Dans chaque aéroport, vous pouvez observer comment on esquive ce problème : avant même de fixer le tube d'arrivée de carburant à un avion, l'employé attache un câble conducteur pour relier le camion (ou la citerne) à l'avion.

Challenge ??, page **??**: On observe les deux étincelles par le biais d'un miroir en rotation rapide. De cette manière, des différences infimes de durées entraînent des différences de position pour ces deux étincelles. Au XIXème siècle, les valeurs de vitesse mesurées selon cette méthode fluctuaient entre 6 000 km/s et la valeur radicalement différente de 100 000 km/s, parce que cette vitesse dépend de la capacité électrique et de l'inductance efficace du fil et du dispositif. La vitesse mesurée est la même que celle de la lumière dans le vide uniquement si ces effets peuvent être négligés, c'est-à-dire pratiquement 300 000 km/s. Dans les fils électriques modernes, la vitesse se situe souvent autour d'un tiers de cette valeur.

Page ??

Challenge 5, page 20: Un énorme fracas surgissait pendant que le pendule métallique cognait violemment les deux clochettes fixées.

Challenge 6, page 23: Non.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

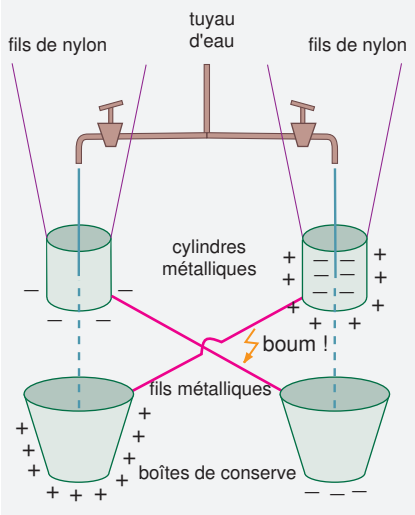


FIGURE 88 Le processus clé à l'œuvre dans le générateur de Kelvin : la séparation des charges pendant la formation des gouttelettes.

Challenge 8, page 24: Le champ à une distance de 1 m d'un électron est de 1,4 nV/m.

Challenge 9, page 24: C'est un simple effet géométrique : tout ce qui s'écoule, de façon homogène, vers l'extérieur d'une sphère diminue avec le carré de la distance.

Challenge 10, page 25: Nous avons $F = \alpha\hbar c N_A^2/4R^2 = 3 \cdot 10^{12}$ N, une force colossale, correspondant au poids de 300 millions de tonnes. Cela montre les forces gigantesques de cohésion de la matière. Bien évidemment, il n'existe aucune façon de conserver 1 g de charges positives ensemble, puisque les forces répulsives autour des charges seraient même encore plus importantes.

Challenge 11, page 26: Pour montrer l'équivalence complète entre les « lois » de Coulomb et de Gauss, montrez d'abord qu'elle est vraie pour une seule charge ponctuelle. Étendez alors ce résultat à plus d'une charge ponctuelle. Cela donne la « loi » de Gauss sous sa forme intégrale, telle qu'elle a été donnée juste avant ce défi.

Pour déduire la forme intégrale de la « loi » de Gauss pour une unique charge ponctuelle, nous devons calculer l'intégrale sur la surface fermée. Ici, le point essentiel consiste à remarquer que cette intégration ne peut être menée à bien que pour une dépendance en l'inverse du carré. Cette dépendance nous permet de transformer le produit scalaire entre le champ local et l'élément de surface en un produit normal entre la charge et l'angle solide Ω :

$$\boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{A} = \frac{q\mathrm{d}A\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{q\mathrm{d}\Omega}{4\pi\varepsilon_0}\,. \tag{94}$$

Dans le cas où cette surface est fermée, cette intégration est alors immédiate.

Pour déduire la forme différentielle de la « loi » de Gauss (statique), à savoir

$$\nabla\boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}\,, \tag{95}$$

faites usage de la définition de la densité de charge ρ et de la relation purement mathématique

$$\int_{\text{surface–fermée}} \boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{A} = \int_{\text{volume–délimité}} \nabla\boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{V}\,. \tag{96}$$

Cette relation mathématique, valable pour un champ vectoriel $\boldsymbol{E}$ quelconque, est appelée le *théorème de Gauss*. Il stipule simplement que le flux d'un vecteur à travers une surface fermée est égal à l'intégrale de la divergence de ce vecteur sur le volume délimité par cette surface.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Pour déduire la forme générale de la loi de Gauss, incluant la dérivée par rapport au temps du champ magnétique, incorporez les effets relativistes en remplaçant votre point de vue par celui d'un observateur en mouvement.

Challenge 13, page 26: Non, les piles ne peuvent que séparer des charges et les prélever autour d'eux.

Challenge 14, page 26: Les corps non chargés peuvent s'attirer les uns les autres s'ils sont constitués de composants chargés qui se neutralisent entre eux, et si les charges ont une liberté de mouvement restreinte. Les fluctuations de charge conduisent alors à l'attraction. La plupart des molécules interagissent entre elles de cette manière, de telles forces sont également à la base de la tension superficielle dans les liquides, et ainsi, de la formation des gouttelettes.

Challenge 16, page 28: Le rapport q/m des électrons et celui des charges libres dans les métaux ne sont pas exactement les mêmes.

Challenge 18, page 30: Découvrez une manière de tester ce problème, faites l'expérience et publiez-la !

Challenge 19, page 31: Si vous le pouvez, publiez le résultat. Des chercheurs ont tenté de placer des gens sur l'océan pendant des journées orageuses, ont essayé des expériences dans des salles obscures, mais il n'en est rien ressorti jusqu'à présent. Les expériences réalisées avec des individus placés dans des appareils d'imagerie par résonance magnétique restent peu convaincantes jusqu'à ce jour.

Challenge 21, page 36: Non.

Challenge 23, page 37: La version correcte de la « loi » d'Ampère est

$$\nabla \wedge \boldsymbol{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \mu_0 \boldsymbol{j} \tag{97}$$

alors que l'expression mentionnée dans le texte omet le terme $\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$.

Pour une autre façon d'établir cette différence, lisez RICHARD P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON & M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, volume II, Addison Wesley, p. 21-1, 1977.

Challenge 24, page 37: Seules les transformations de Lorentz avec des vitesses relativistes mélangent significativement les champs magnétiques et électriques.

Challenge 26, page 38: Le champ dual $*\mathrm{F}$ est défini à la page 54.

Challenge 28, page 39: Les produits scalaires de quatre vecteurs sont toujours, par construction, des quantités invariantes sous les transformations de Lorentz.

Challenge 31, page 40: Presque toutes les particules neutres sont constituées de particules chargées. Donc cet argument se tient également pour elles. Il n'y a qu'une seule exception : les neutrinos. Pour ceux-ci, l'argument n'est plus valable.

Challenge 32, page 41: La vitesse de signal dans les métaux est supérieure à la vitesse de l'électron, c'est-à-dire à peu près la vitesse de la lumière. Cette vitesse détermine l'intensité du champ magnétique.

Page 124

Challenge 33, page 42: Le rayonnement du soleil modifie l'ionisation de la haute atmosphère et engendre de la convection dans l'ionosphère. Les marées déplacent les ions dans l'océan et dans l'atmosphère. Ces courants produisent des champs magnétiques qui peuvent être perçus par les aiguilles des boussoles sensibles.

Page 47

Challenge 34, page 43: Si vous découvrez un tel effet et si vous êtes capable de l'expliquer, publiez-le dans une revue de vulgarisation.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 35, page 43: Généralement, les câbles des lignes à haute tension sont trop chauds pour être confortables.

Challenge 36, page 43: Les enfants blonds ont tendance à avoir les cheveux plus fins, produisant ainsi l'effet le plus flagrant. Le temps sec est nécessaire pour éviter que l'humidité de l'air ne décharge la tête, ce qui empêcherait les cheveux de se hérisser.

Challenge 37, page 43: Déplacez-les de façon à façonner une forme en T.

Challenge 38, page 43: Pour trois interrupteurs et plus, utilisez des inverseurs. Un inverseur est un interrupteur qui possède deux entrées et deux sorties, pour lequel dans une position on connecte la première et la deuxième entrée à, respectivement, la première et la deuxième sortie, et dans l'autre position on connecte la première entrée à la deuxième sortie et vice-versa. (Il existe d'autres possibilités, toutefois ; les fils peuvent être supprimés en utilisant des interrupteurs à relais électromagnétiques.)

Challenge 40, page 45: C'est possible, cependant les systèmes conçus jusqu'ici sont imposants et sont dangereux pour la santé humaine. L'idée qui consiste à collecter la puissance solaire dans l'espace lointain puis à l'envoyer sous forme de faisceaux micro-ondes vers la Terre a souvent été divulguée. Les enjeux financiers et les risques encourus ont bloqué ce projet jusqu'à présent.

Challenge 41, page 45: Collez deux miroirs ensemble à angle droit. Ou regardez-vous sur votre téléviseur en utilisant une caméra vidéo.

Challenge 42, page 45: C'est à nouveau un exemple de triboluminescence et de triboélectricité combinées. Consultez également les sites Web scienceworld.wolfram.com/physics/Triboluminescence.html et www.geocities.com/RainForest/9911/tribo.htm.

Challenge 44, page 46: Le poivre est plus léger que le sel, et réagit donc à la cuillère avant le sel.

Challenge 45, page 47: Pour une longueur d'onde de 546,1 nm (vert de référence), cela correspond à un peu plus de 18 longueurs d'ondes.

Challenge 46, page 48: La taille angulaire du Soleil est trop grande, la diffraction ne joue ici aucun rôle.

Challenge 47, page 48: Utilisez simplement un appareil photographique à temps de pose très bref.

Challenge 48, page 48: Le courant circule perpendiculairement au champ magnétique et est donc dévié. Il entraîne l'aimant tout entier avec lui.

Challenge 49, page 49: La lumière fait plusieurs fois le tour de la Terre en une seconde.

Challenge 50, page 49: À 10 pc=32,6 al, le Soleil aurait une magnitude apparente de 4,7. À 20 pc=65,2 al, il paraîtrait 4 fois plus pâle, soit 1,5 environ de magnitude supplémentaire, par conséquent avec une magnitude visuelle apparente d'environ 6,2. Celle-ci est proche de la magnitude limite de l'œil. La véritable magnitude limite de l'œil n'est ni constante ni universelle, donc la distance de 50 années-lumière n'est pas une limite partagée par tous. La magnitude limite, comme la vision nocturne – ou *sensibilité scotopique* –, dépend de la pression partielle de l'oxygène dans l'atmosphère que l'observateur est en train de respirer, de la clarté de l'air, de l'angle zénithal, et, par dessus tout, du degré d'adaptation à l'obscurité. Un œil exposé à la luminosité totale du ciel nocturne dans un endroit très sombre, éloigné de toute pollution lumineuse, n'est toujours pas entièrement adapté à l'obscurité. Vous pouvez facilement apercevoir les étoiles de magnitude 7 en masquant la majorité du ciel et en observant simplement une petite parcelle de celui-ci. Certains observateurs, dans des conditions idéales, ont affirmé, de façon crédible, avoir vu des étoiles proches de la magnitude 8.

Challenge 52, page 50: L'équivalent le plus simple d'une bobine est une masse rotative qui est mise en rotation par l'eau qui s'écoule. Un transformateur serait alors constitué de deux masses de cette sorte reliées par leur axe.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 55, page 50: La couche chargée agit de telle sorte que, pratiquement, seuls les ions de charge unique traversent les canaux. Par conséquent, les charges sont séparées des deux côtés du liquide, et un courant est généré.

Challenge 57, page 51: Des fuites de courant changent cette illustration. Le rapport des tensions à long terme est donné par le rapport de la fuite de résistance $V_1/V_2 = R_1/R_2$, comme nous pouvons aisément le vérifier dans les expériences.

Challenge 64, page 56: Une certaine quantité de mouvement est emportée par le champ électromagnétique.

Challenge 65, page 57: Les lignes du champ et les surfaces équipotentielles sont toujours perpendiculaires les unes aux autres. Donc une ligne du champ ne peut pas traverser deux fois une surface équipotentielle.

Challenge 74, page 63: L'argument est le même que pour l'accroissement de l'entropie : les processus renversés sont possibles, mais leur probabilité est si faible qu'ils n'apparaissent jamais en pratique. Cette probabilité extrêmement faible est due aux fluctuations induites par l'environnement.

Challenge 75, page 64: Dessinez tout simplement un courant qui circule à travers une bobine avec son champ magnétique, dessinez alors l'image miroir de ce courant puis redessinez le champ magnétique.

Challenge 76, page 65: L'hélicité des molécules d'ADN qui structurent les chromosomes et de nombreuses autres molécules dans les systèmes vivants, l'inclination droitière de la plupart des hommes, l'asymétrie d'espèces de poisson qui restent généralement plats au fond de la mer, sont d'autres asymétries de la nature.

Challenge 77, page 65: Cela est absolument impossible en utilisant des systèmes ou des effets gravitationnels ou électromagnétiques. La seule manière d'y parvenir est d'utiliser l'interaction nucléaire faible, comme indiqué dans le chapitre sur le noyau.

Challenge 78, page 65: Le lagrangien ne change pas si l'une des trois coordonnées est remplacée par sa valeur négative.

Challenge 79, page 65: L'image bascule vers le haut : une rotation de 90 degrés tourne l'image de 180 degrés.

Challenge 80, page 66: Imaginez E et B comme étant les vecteurs unitaires de deux axes situés dans l'espace complexe. Alors une rotation quelconque de ces axes est également une symétrie généralisée par dualité.

Challenge 81, page 66: La constante de structure fine est remplacée par sa valeur inverse. Ainsi 1/137,036 devient 137,036. Cela implique que le concept de particule et de vide soit radicalement modifié. Il est possible, dorénavant, de rendre compréhensible cette situation que nous qualifions de *couplage fort* : c'est la raison pour laquelle les théoriciens s'intéressent de manière générale aux dualités.

Challenge 82, page 69: Le moment cinétique a été introduit dans ce système lorsqu'il a été formé. Si nous déplaçons une charge ponctuelle depuis l'infini en suivant une ligne droite jusqu'à sa position finale, proche d'un dipôle magnétique, la force magnétique qui agit sur la charge n'est pas dirigée le long de la ligne de mouvement. Elle engendre par conséquent un couple non nul autour de l'origine. Lisez J. M. AGUIRREGABIRIA & A. HERNANDEZ, The Feynman paradox revisited, *European Journal of Physics* **2**, pp. 168–170, 1981.

Challenge 83, page 69: Montrez que même si le champ magnétique radial d'une onde sphérique s'annule par définition, les équations de Maxwell exigeraient de lui qu'il soit différent de zéro. Puisque les ondes électromagnétiques sont transversales, il suffit aussi de montrer qu'il est impossible de peigner une sphère chevelue sans obtenir une (double) touffe spiroïdale ou deux

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

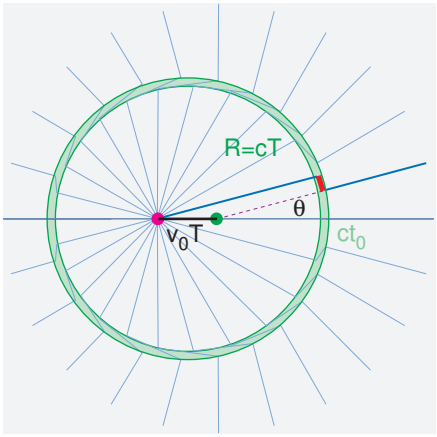


FIGURE 89 Calcul du champ transversal d'une charge accélérée.

touffes spiroïdales simples. Malgré ces affirmations, la théorie quantique modifie d'une certaine façon cette vision des choses : la probabilité d'émission d'un photon par un atome excité placé dans un état dégénéré est précisément à symétrie sphérique.

Challenge 87, page 69: Le rayonnement émis est fortement réprimé parce que la taille du dipôle (la prise de courant) est beaucoup plus petite que la longueur d'onde du champ.

Challenge 89, page 73: Dans toutes les situations d'interférence, l'énergie est redistribuée dans d'autres directions. C'est la règle générale, parfois il est assez compliqué de découvrir cette autre direction.

Challenge 90, page 74: L'auteur voit environ 7 lignes régulièrement espacées, en supposant que la distance est d'environ 20 μm, cela fait à peu près 3 μm par ligne. La longueur d'onde doit être plus petite que cette valeur et donc la fréquence plus grande que 100 THz. Les valeurs réelles pour diverses couleurs sont données dans le tableau du spectre électromagnétique.

Challenge 92, page 75: Il remarqua que lorsqu'un prisme produit un arc-en-ciel, un thermomètre placé dans la région située après la couleur rouge révélait une hausse de température.

Challenge 93, page 76: La biréfringence apparaît lorsque la réfraction est dépendante de la polarisation. Seules deux polarisations linéaires indépendantes sont possibles, donc il n'existe pas de triréfringence dans la nature. Cela reste également vrai pour les cristaux, qui possèdent trois indices de réfraction distincts dans trois directions !

Challenge 94, page 76: La lumière réfléchie sur une surface d'eau est partiellement polarisée. Les mirages ne le sont pas.

Challenge 98, page 84: La Figure 89 montre le champ transversal E_t dessiné en rouge. Nous supposons que la charge se déplace à une vitesse initiale v_0 petite et décélère jusqu'à une vitesse nulle en un temps t_0. Après qu'une durée T se soit écoulée, l'impulsion de rayonnement a traversé une distance $R = cT$, où $T \ll t_0$. La figure montre que le champ transversal est relié au champ radial E_r par

$$\frac{E_t}{E_r} = \frac{v_0 T \sin\theta}{c t_0} = \frac{aR \sin\theta}{c^2} \,. \tag{98}$$

En y insérant l'expression de Coulomb pour le champ radial nous obtenons

$$E_t = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c^2} \frac{a \sin\theta}{R} \,. \tag{99}$$

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L'intensité du champ transversal dépend de l'angle θ, cela est flagrant dans la Figure 43 de la page 85.

Challenge 99, page 86: Un tel voyageur observerait un champ ondulé mais statique, ce qui ne peut pas exister, comme le montrent les équations du champ électromagnétique.

Challenge 100, page 86: Vous ne seriez jamais mort. Pourriez-vous atteindre la limite de l'Univers ?

Challenge 101, page 87: Le sirop révèle un effet encore plus magnifique dans le dispositif suivant. Prenez un long tube transparent fermé à une extrémité et remplissez-le de sirop. Éclairez l'intérieur du tube à partir du bas avec un laser rouge à hélium–néon. Introduisez alors un polariseur linéaire dans le faisceau : la lumière observée dans le tube formera une spirale. En faisant tourner le polariseur vous pouvez faire avancer ou reculer la spirale. Cet effet, dénommé *activité optique* (ou *pouvoir rotatoire*) du sucre, est due à l'aptitude du sucre de faire tourner la polarisation lumineuse et à une certaine propriété spécifique des plantes : elles ne produisent qu'une seule des deux formes miroirs du sucre.

Challenge 102, page 88: La formule des lentilles minces est

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \,. \tag{100}$$

Elle est valable pour des lentilles divergentes et convergentes, à partir du moment où leur propre épaisseur est négligeable. La puissance d'une lentille peut donc être mesurée avec la quantité $1/f$. L'unité $1\,\mathrm{m}^{-1}$ est appelée une *dioptrie*, elle est utilisée spécialement pour les verres correcteurs. Les lentilles convergentes ont des valeurs positives, les lentilles divergentes des valeurs négatives.

Toutefois, la formule des lentilles minces n'est qu'une approximation, et n'est jamais employée dans la conception des lentilles. C'est une relique des anciens ouvrages. Les concepteurs des lentilles modernes utilisent toujours l'optique gaussienne pour les calculs. (Lisez, par exemple, Francis A. Jenkins & Harvey E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, 1957.)

Challenge 104, page 88: Un microscope optique est essentiellement composé de deux lentilles convergentes. Une lentille – ou système de lentilles – produit une image réelle agrandie et la seconde produit une image virtuelle agrandie de l'image réelle précédente. La Figure 90 montre également que les microscopes retournent toujours les images à l'envers. À cause de la longueur d'onde de la lumière, les microscopes optiques possèdent une résolution maximale d'environ 1 µm. Remarquez que le grossissement des microscopes n'est pas limité, ce qui est limité c'est leur résolution. Les images numériques dénotent exactement le même comportement. La *résolution* est simplement la taille du pixel le plus petit possible qui semble raisonnable.

Challenge 106, page 89: La dispersion dans le cristallin conduit à des positions apparentes différentes des images, comme indiqué dans la Figure 91. Pour plus de détails sur la dispersion dans l'œil humain et les manières d'en tirer profit pour engendrer des effets en trois dimensions, lisez l'article de C. Ucke & R. Wolf, Durch Farbe in die dritte Dimension, *Physik in unserer Zeit* **30**, pp. 50–53, 1999.

Challenge 107, page 90: Le faisceau de 1 mm reviendrait 1 000 fois plus large que le faisceau de 1 m. Un rayon parfait de 1 m de large de lumière verte ferait 209 m de large sur la Lune, pouvez-vous déduire ce résultat à partir de la formule (importante) qui contient la distance, la longueur d'onde, le diamètre initial et le diamètre final ? Essayez d'abord de deviner cette magnifique formule, puis déduisez-la. En réalité, les valeurs sont plusieurs fois plus grandes que le minimum théorique ainsi calculé. Consultez les sites Web www.csr.utexas.edu/mlrs et ilrs.gsfc.nasa.gov.

Challenge 108, page 90: On dit souvent que l'évolution a ajusté le nombre de cônes présents dans l'œil à la résolution maximale avec la pupille ouverte, les spécialistes sur ce sujet maintiennent cependant qu'il y a un nombre légèrement plus grand de cônes.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

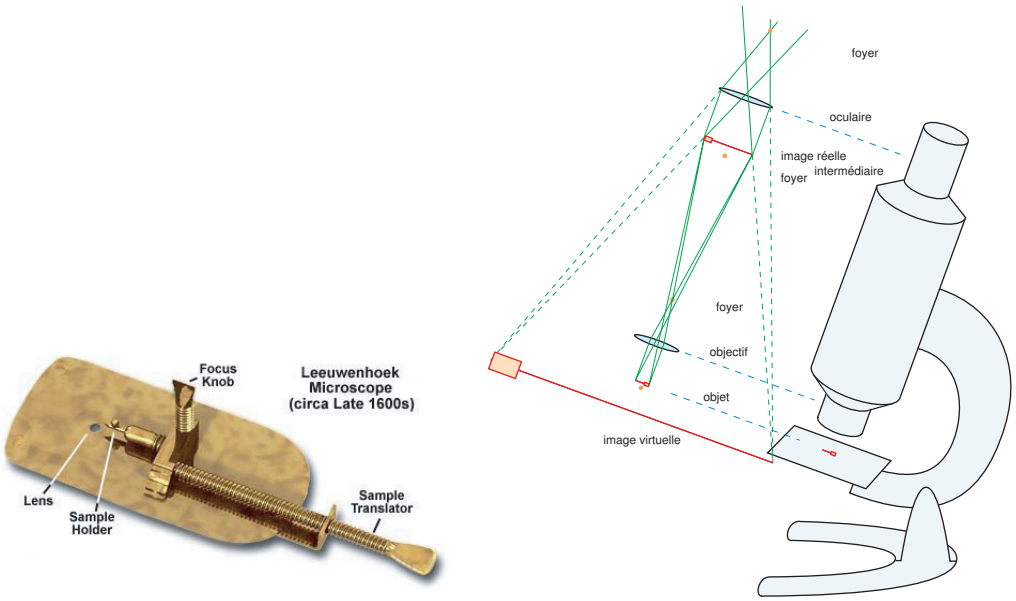


FIGURE 90 Le premier microscope n'avait qu'une lentille (longueur 8 cm env., qui doit être maintenue à proximité de l'œil) mais avec deux lentilles convergentes nous avons un microscope moderne.

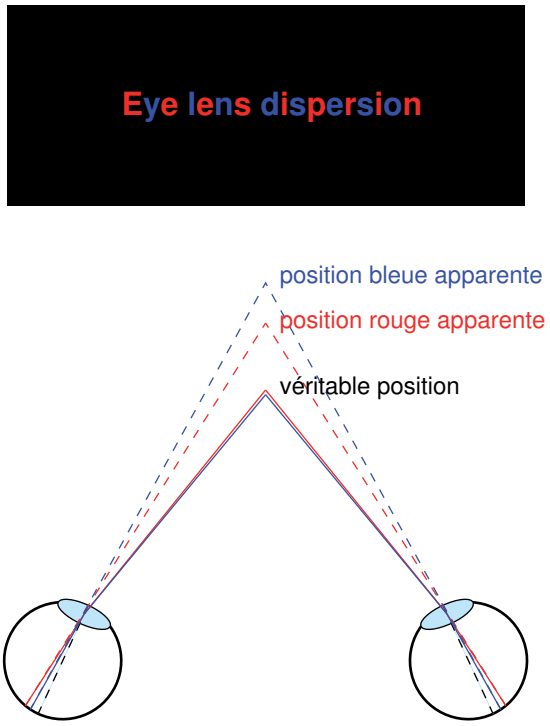


FIGURE 91 La relation entre l'effet coloré et la dispersion du cristallin.

Challenge 109, page 90: La réponse devrait se situer entre une et deux douzaines de kilomètres, en faisant l'hypothèse de circonstances atmosphériques idéales.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 114, page 94: Une surface de 1 m^2 perpendiculaire à la lumière reçoit environ 1 kW de rayonnement. Celui-ci engendre la même pression que le poids de 0,3 mg environ de matière. Cela produit une pression de 3 µPa pour des surfaces noires, et le double pour des miroirs.

Challenge 116, page 94: Le côté brillant reçoit le double de la quantité de mouvement transférée par rapport au côté noir, et devrait donc être poussé vers l'arrière.

Challenge 119, page 97: Un polariseur peut réaliser cela.

Challenge 122, page 97: Les motifs d'interférence varient lorsque les couleurs sont modifiées. Les arcs-en-ciel se manifestent également parce que les couleurs distinctes sont dues à des fréquences différentes.

Challenge 124, page 98: L'arc-en-ciel complet est rond comme un cercle. Vous pouvez en produire un avec le tuyau d'arrosage de votre jardin, si vous gardez la lance dans votre main pendant que vous vous tenez debout sur une chaise, avec votre dos tourné vers le Soleil du soir. (Bien sûr, il manque une petite chose : pouvez-vous imaginer laquelle ?) Le cercle est dû à la forme sphérique des gouttelettes. Si celles-ci étaient de forme différente, *et* si elles étaient toutes alignées, l'arc-en-ciel aurait une forme différente de celle d'un simple cercle.

Challenge 129, page 102: Filmez une explosion de supernova lointaine et vérifiez si elle se produit au même instant pour chaque couleur séparément.

Challenge 131, page 105: La première partie de la vitesse précurseur est une caractéristique ayant la longueur d'onde effective la plus courte possible, elle est donc donnée en considérant la limite pour une fréquence infinie.

Challenge 132, page 105: La lumière est pulsée, donc c'est la vitesse de l'énergie.

Challenge 133, page 105: Dans la matière, l'énergie est transférée aux atomes, puis redevient lumière, et retourne dans les atomes suivants, etc. Cela prend du temps et ralentit la propagation.

Challenge 135, page 108: Cela reste vrai même en relativité générale, lorsque la courbure du vide est examinée.

Challenge 136, page 109: Pratiquement aucune lumière ne passe : l'intensité de la lumière ténue qui est transmise dépend exponentiellement du rapport entre la longueur d'onde et le diamètre du trou. Nous disons également qu'après le trou il y a une onde évanescente.

Challenge 139, page 110: Pas vraiment : un catadioptre utilise deux réflexions sur les côtés d'un cube. Un œil de chat vivant possède un grand nombre de réflexions. L'effet final reste le même cependant : la lumière rebrousse chemin dans la direction où elle est arrivée.

Challenge 140, page 110: Il y a un angle mort dans l'œil : c'est une région dans laquelle les images ne sont pas perçues. Le cerveau suppose ainsi que l'image à cet endroit est la même qu'à ses frontières. Si un point tombe exactement dans celle-ci, il disparaît.

Challenge 142, page 114: L'œil et le cerveau n'intervertissent certainement pas la direction haute et basse à un certain âge. Hormis cela, d'où vient cette idée que les bébés voient à l'envers ?

Challenge 143, page 114: L'œil et le système visuel soustraient les motifs qui sont constants dans le temps.

Challenge 145, page 116: En réalité, il n'y a aucune chance pour qu'un hologramme d'un individu puisse rôder autour d'une personne réelle et puisse l'effrayer. Un hologramme est toujours transparent, nous pouvons toujours apercevoir l'arrière-plan à travers celui-ci. Un hologramme donne ainsi toujours une impression similaire à ce que les films de cinéma montrent généralement sous la forme de fantômes.

Challenge 146, page 119: La température moyenne de la Terre est donc de 287 K. L'énergie issue du Soleil est proportionnelle à la quatrième puissance de la température. L'énergie est diffusée sur (approximativement) la moitié de la surface terrestre. La même énergie, à la surface du

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Soleil, provient d'une surface beaucoup plus petite, donnée par le même angle que la Terre sous-tend à cet endroit. Nous avons donc $E \sim 2\pi R_{\text{Terre}}^2 T_{\text{Terre}}^4 = T_{\text{Soleil}}^4 R_{\text{Terre}}^2 \alpha^2$, où α est la moitié de l'angle sous-tendu par le Soleil. Par conséquent, on estime que la température du Soleil vaut $T_{\text{Soleil}} = (T_{\text{Terre}}^4/\alpha^2)^{0,25} = 4\,\text{kK}$.

Challenge 150, page 120: Parce que le maximum d'un spectre en longueurs d'ondes et en fréquences n'est pas le même, donc il *ne* vérifie *pas*, et ne peut pas vérifier, la relation $c = f\lambda$.

Challenge 153, page 120: À une température élevée, tous les corps s'approchent des corps noirs. Cette couleur est plus importante que les autres effets sur la couleur. Le four et l'objet ont la même température. Nous ne pouvons donc pas les distinguer l'un de l'autre. Pour pouvoir le faire cependant, éclairez la scène avec une lumière puissante puis prenez une photo avec une sensibilité réduite. Nous avons ainsi toujours besoin de fournir de la lumière pour prendre des photos de ce qui se passe à l'intérieur du feu.

Challenge 154, page 122: La surface verte observée selon un grand angle proche du sol est plus grande que lorsqu'elle est vue verticalement, où nous voyons également le sol. Le sol est recouvert par l'herbe verte lorsque l'angle d'observation est bas.

Challenge 155, page 122: C'est réellement vrai. Les télescopes modernes possèdent une grande surface de collecte de la lumière (jusqu'à $50\,\text{m}^2$) et sont dotés de détecteurs extrêmement sensibles. Le nombre de photons émis par le craquement d'une allumette sur la Lune dans la direction d'un grand télescope (de quelle taille ?) est suffisant pour déclencher le détecteur.

Challenge 156, page 122: Non, bien sûr, puisque la vitesse de groupe n'est pas limitée par la relativité restreinte. La vitesse de l'énergie est limitée, mais elle n'est pas concernée par ces expériences.

Challenge 158, page 123: L'explorateur prussien Alexander von Humboldt vérifia soigneusement la véracité de cette légende au cours du dix-neuvième siècle. Il explora de nombreux puits miniers et interrogea une quantité innombrable de mineurs au Mexique, au Pérou et en Sibérie sur leurs expériences. Il interrogea également de nombreux ramoneurs. Ni lui ni qui que ce soit d'autre a déjà vu les étoiles pendant la journée.

Challenge 159, page 124: Regardez le défi 28.

Challenge 160, page 124: Les électrons se déplacent lentement, en revanche la vitesse des signaux électriques n'est pas déterminée par la vitesse de l'électron, mais par le temps que mettent les électrons pour se mouvoir. Imaginez une longue queue de voitures (qui représentent les électrons) qui attendent devant un feu rouge. Tous les conducteurs regardent le feu. Dès qu'il passe au vert, tout le monde commence à rouler. Bien que la vitesse de conduite pourrait être de 10 m/s seulement, la vitesse de l'écoulement du trafic au début était celui de la lumière. C'est cette dernière vitesse qui représente la vitesse des signaux électriques.

Les canalisations d'eau révèlent la même chose. Un long tuyau délivre de l'eau pratiquement au même moment où le robinet est ouvert, même si l'eau met un temps fou pour aller du robinet jusqu'à l'extrémité du tuyau. La vitesse à laquelle l'eau réagit est donnée par la vitesse des ondes de pression dans l'eau. Même pour les tuyaux d'arrosage, la vitesse de signal, approximativement donnée par la vitesse du son dans l'eau, est beaucoup plus importante que la vitesse de l'écoulement de l'eau.

Challenge 161, page 125: Nous pouvons mesurer les fluctuations de courant, ou mesurer les charges les plus petites, en montrant qu'elles sont toujours des multiples d'une même unité. La dernière méthode fut utilisée par Millikan.

Challenge 164, page 125: Le potentiel de la Terre serait de $U = -q/(4\pi\varepsilon_o R) = 60\,\text{MV}$, où le nombre d'électrons dans l'eau doit être pris en ligne de compte.

Challenge 165, page 126: Il y a toujours une erreur expérimentale lorsque nous mesurons des

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

valeurs de champ, même lorsque nous mesurons un champ électromagnétique « évanescent ».

Challenge 166, page 128: Le corps humain est légèrement conducteur, il change la forme du champ et donc le court-circuite vraiment. Généralement, le champ ne peut pas être utilisé pour générer de l'énergie, puisque les courants concernés sont beaucoup trop faibles. (Les flashs de l'éclair constituent un domaine à part, bien sûr. Ils sont dus – très indirectement – au champ de la Terre, mais ils sont trop irréguliers pour être utilisés de manière routinière. Le paratonnerre de Franklin en constitue un spécimen.)

Challenge 167, page 129: Le champ situé à la surface d'une sphère de rayon r est donné par $E = Q/4\pi\varepsilon_0 r^2$. En incorporant $E = 200\,\mathrm{V/m}$, nous obtenons $Q = 0{,}9\,\mathrm{MC}$.

Challenge 168, page 133: Si vous découvrez une méthode qui est différente des estimations connues, publiez-la.

Challenge 170, page 134: Cela pourrait être possible dans un futur proche, mais à la fois l'expérience, qui mesurera probablement les subtilités du champ magnétique du cerveau, et la vérification précise de sa crédibilité ne seront pas simples.

Challenge 176, page 137: Toutes les illusions concernant la lévitation nous donnent l'impression que le magicien est maintenu par des fils, comme de nombreuses personnes l'ont observé, y compris l'auteur. (Les flashs photographiques sont interdits, un arrière-plan étincelant est installé afin de rendre difficile l'observation des fils, aucun anneau n'a jamais vraiment été manipulé autour du magicien, l'aquarium dans lequel il flotte est toujours ouvert pour laisser passer les lignes de pêche à travers, c'est toujours le même partenaire qui est choisi « au hasard » dans le public, etc.) Les renseignements fournis par les témoins oculaires qui ont réellement aperçu les lignes de pêche utilisées par David Copperfield donnent une justification à ces dispositifs. Le groupe de discussion alt.magic.secrets, en particulier Tilman Hausherr, a été d'une importance cruciale dans l'éclaircissement de ce problème dans tous ses détails, y compris le nom de la société qui fabrique le mécanisme de suspension.

Challenge 178, page 138: Un quelconque effet nouveau serait digne d'une publication.

Challenge 179, page 142: L'énergie sonore est également possible, de même que le travail mécanique.

Challenge 180, page 144: La déformation de l'espace-temps n'est pas reliée à l'électricité, tout du moins aux énergies courantes. Près des énergies de Planck, cela pourrait être différent, mais nous n'avons encore rien conjecturé jusqu'à présent.

Challenge 182, page 146: L'absorption parfaite, c'est la noirceur (bien que cela puisse être la rougeur ou la blancheur à des températures plus élevées).

Challenge 183, page 146: En réalité, le Soleil émet environ $4 \cdot 10^{26}$ W à partir de sa masse de $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit environ 0,2 mW/kg. Le corps humain adulte (au repos) émet environ 100 W (vous pouvez vérifier ceci au lit la nuit), donc environ 1,2 W/kg. C'est à peu près 6 000 fois plus que le Soleil.

Challenge 184, page 146: Les charges situées dans un métal se réorganisent de telle sorte que le champ situé à l'intérieur demeure nul. C'est ce qui fait que dans les voitures et les avions nous sommes en sûreté contre les orages. Bien sûr, si le champ extérieur varie si promptement que ce nouvel arrangement ne peut pas se faire à temps, des champs *peuvent* pénétrer dans la cage de Faraday. (À ce propos, des champs ayant des grandes longueurs d'onde traversent également les métaux, les télécommandes emploient régulièrement des fréquences de l'ordre de 25 kHz pour ce faire.) Cependant, nous devons patienter un peu avant de sortir d'un véhicule après qu'un éclair l'ai frappé, puisque celui-ci repose sur des pneus en caoutchouc ayant une faible conduction, cette attente donne le temps aux charges de circuler vers le sol.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

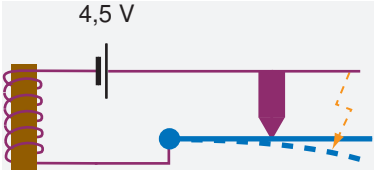


FIGURE 92 Comment recevoir des chocs électriques avec une pile de 4,5 V.

Pour la gravitation et les cages solides, le réagencement de masse n'est pas possible, donc les boucliers gravitationnels n'existent pas.

Challenge 188, page 147: C'est un sujet sensible. Nous ne sommes pas sûrs que les champs de 50 Hz soient dangereux pour les êtres humains. Il est fortement probable que ce ne soit pas le cas, mais ce problème n'est pas tranché.

Challenge 189, page 148: Le nombre de photons multiplié par le quantum d'action $\hbar$.

Challenge 191, page 148: L'accumulation de charges cesse parce qu'un satellite négativement chargé repousse les électrons et donc stoppe tout mécanisme de collecte d'électrons. Les électrons sont capturés plus souvent que les ions parce qu'il est plus facile pour eux que pour les ions d'avoir une collision inélastique avec le satellite, à cause de leur vitesse plus élevée à une température donnée.

Challenge 192, page 149: N'importe quel mécanisme de déperdition donnera une explication à la perte d'énergie, tel que la résistance électrique ou le rayonnement électromagnétique. Après une fraction de seconde, l'énergie sera perdue. Ce petit problème soulève de nombreuses discussions sur Internet.

Challenge 194, page 149: Utilisez le fil métallique comme indiqué dans la Figure 92. *Si* l'oscillation est convenablement ajustée en fréquence, *si* le contact se détache correctement à l'extrémité, et *si* vous empoignez franchement les deux contacts, vous recevrez un choc si fort que vous ne pourrez tenir debout.

Challenge 198, page 161: La question est : l'« Univers » est-il un concept ? Nous en dirons plus à ce sujet dans la dernière partie de ce texte.

Challenge 200, page 167: Lorsque nous pensons, l'énergie physique, la quantité de mouvement et le moment cinétique sont conservés, et l'entropie thermodynamique n'est pas détruite. Toute expérience qui montre quelque chose de différent ferait allusion à des processus inconnus. Cependant, nous n'avons aucune pièce à conviction dans l'existence de tels processus.

Challenge 201, page 167: La meilleure méthode ne peut pas être beaucoup plus courte que ce qui est nécessaire pour décrire 1 dans 6 000 millions, ou 33 bits. Les systèmes de codes postaux hollandais et anglo-saxon (y compris les lettres NL ou UK) ne sont pas très loin de cette valeur et peuvent donc se proclamer être très efficaces.

Challenge 202, page 167: Pour les systèmes complexes, lorsque les inconnues sont nombreuses, le progrès est ainsi simplement donné par l'augmentation du nombre de réponses. Pour l'Univers dans sa globalité, le nombre de problèmes ouverts est plutôt faible, comme indiqué à la page **??**, on remarque qu'il n'y a pas eu beaucoup de progrès ces dernières années. Mais dans ce cas aussi, les avancées sont clairement mesurables.

Challenge 203, page 168: Est-il possible d'employer le mot « complète » lorsque nous décrivons la nature ?

Challenge 206, page 169: Il y a une succession de plusieurs bains : des bains thermiques dans chaque cellule sensible à la lumière dans les yeux, des bains thermiques à l'intérieur des nerfs reliés au cerveau et des bains thermiques dans les cellules cérébrales.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 208, page 170: Oui.

Challenge 211, page 177: Les physiciens affirment que les propriétés des objets, de l'espace-temps et des interactions forment la plus petite liste possible. Cependant, cette liste est plus longue que celle découverte par les linguistes ! La raison est que les physiciens ont découvert des primitives qui n'apparaissent pas dans la vie de tous les jours. Dans un sens, l'aspiration des physiciens est limitée par la liste des questions sans réponse sur la nature, donnée à la page **??**.

Challenge 212, page 179: Aucun ne possède de contenu défini, de limites clairement établies ou de domaine d'application.

Challenge 213, page 179: Impossible ! Cela ne serait plus un concept, puisqu'il n'aurait plus de contenu. La solution à ce problème doit être, et sera, différente.

Challenge 214, page 182: À aucune d'entre elles. Ce paradoxe montre qu'un tel « ensemble de tous les ensembles » n'existe pas.

Challenge 215, page 182: La plus célèbre est la classe de tous les ensembles qui ne se contiennent pas eux-mêmes. Ce n'est pas un ensemble, mais une classe.

Challenge 216, page 182: Le partage des gâteaux est un problème ardu. Une méthode élémentaire qui résout de nombreux problèmes – mais pas tous – entre N personnes P1 ... PN est la suivante :

— P1 coupe le gâteau en N parts,
— P2 à PN choisissent un morceau,
— P1 garde la dernière part,
— P2 ... PN réassemblent leurs parts en une seule,
— Alors P2 ... PN réitèrent l'algorithme avec une personne en moins.

Ce problème est beaucoup plus compliqué si l'assemblage n'est pas permis. Une méthode *juste* (en un nombre fini d'étapes) pour 3 personnes, et faisant neuf étapes, fut publiée en 1944 par Steinhaus, et une méthode *totalement satisfaisante* dans les années 1960 par John Conway. Une méthode totalement satisfaisante pour quatre personnes ne fut découverte qu'en 1995, elle possède 20 étapes.

Challenge 217, page 182: $(x, y) := \{x, \{x, y\}\}$.

Challenge 218, page 184: Indice : montrez que toute énumération dénombrable des réels omet au moins un nombre. C'est Cantor qui démontra cela pour la première fois. Sa méthode consistait à noter cette liste en développement décimal puis à rechercher un nombre qui n'est sûrement pas dans cette liste. Deuxième indice : son truc mondialement célèbre s'appelle l'argument de la diagonale de Cantor.

Challenge 219, page 184: Indice : tous les nombres réels sont des limites de séries de nombres rationnels.

Challenge 221, page 186: Oui, mais à condition seulement que la division par zéro est interdite, et que les nombres sont limités aux rationnels et aux réels.

Challenge 222, page 186: Ils sont infiniment nombreux. Mais le plus petit est déjà suffisamment grand : 10169491525423728813559322033898305084745762711864406779 66. Si le chiffre six est remplacé dans cette énigme, on trouve que la plus petite solution pour 1 est 1, pour 4 c'est 102564, pour 5 c'est 142857, pour 8 c'est 1012658227848, pour 2 c'est 105263157894736842, pour 7 c'est 1014492753623188405797, pour 3 c'est 1034482758620689655172413793, et pour 9 c'est 1011235955056179775280898876404494382022471 9. La plus petite solution pour 6 est le nombre le plus grand de cette liste.

Challenge 223, page 187: $0 := \varnothing$, $1 := \{\varnothing\}$, $2 := \{\{\varnothing\}\}$ etc...

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 224, page 190: Pour la soustraction, c'est facile. L'addition n'est pas commutative uniquement dans les situations où des nombres infinis sont concernés : $\omega + 2 \neq 2 + \omega$.

Challenge 225, page 191: $1 - \varepsilon$ ou $1 - 4\varepsilon^2 - 3\varepsilon^3$ en sont des exemples.

Challenge 226, page 191: La réponse est 57, la référence citée fournit les détails.

Challenge 227, page 193: $2^{2^{22}}$ et $4^{4^{4^4}}$.

Challenge 229, page 193: L'enfant est âgé de moins 0,75 ans, soit moins 9 mois : le père est donc très près de la mère.

Challenge 230, page 194: Ce n'est pas une question facile. Les premiers nombres non triviaux sont 7, 23, 47, 59, 167 et 179. Consultez Robert Matthews, Maximally periodic reciprocals, *Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications* **28**, pp. 147–148, 1992. Matthews montre qu'un nombre n pour lequel $1/n$ engendre le maximum de $n - 1$ chiffres décimaux dans son développement décimal fait partie d'une catégorie particulière de nombres premiers qui peut être déduite à partir de ce que l'on nomme les *nombres premiers S de Sophie Germain*. Nous devons avoir $n = 2S + 1$, où S et $2S + 1$ sont tous les deux des nombres premiers et où S mod 20 doit être égal à 3, 9, ou 11.

Ainsi les premiers nombres n sont 7, 23, 47, 59, 167 et 179, correspondants aux valeurs de S 3, 11, 23, 29, 83 et 89. En 1992, le nombre connu S le plus grand qui répond aux critères était

$$S = (39051 \cdot 2^{6002}) - 1\,, \tag{101}$$

un nombre premier de Sophie Germain long de 1 812 chiffres qui est égal à 3 mod 20. Il fut découvert par Wilfred Keller. Ce nombre premier de Sophie Germain entraîne l'existence d'un nombre premier n qui possède un développement décimal d'environ 10^{1812} chiffres de long avant qu'il commence à se répéter lui-même. Lisez votre ouvrage préféré sur la théorie des nombres pour avoir plus de renseignements. De manière intéressante, la solution à ce défi est également reliée à celle du défi 222. Pouvez-vous en dire plus ?

Challenge 231, page 194: Klein n'appartenait à aucun de ces groupes. Par conséquent, certains de ses étudiants les plus désagréables concluaient qu'il n'était pas un mathématicien.

Challenge 232, page 194: Un barbier ne peut pas appartenir à l'un de ces groupes, la définition du barbier est donc contradictoire et doit être rejetée.

Challenge 233, page 194: Consultez la page Web members.shaw.ca/hdhcubes/cube_basics.htm pour plus d'informations sur les cubes magiques.

Challenge 234, page 194: Une telle expression est déduite grâce au résultat intermédiaire $(1 - 2^2)^{-1}$. La manipulation des séries divergentes semble absurde, mais les mathématiciens savent comment attribuer à cette expression un contenu explicite. (Lisez Godfrey H. Hardy, *Divergent Series*, Oxford University Press, 1949.) Les physiciens utilisent souvent des expressions similaires sans vraiment y prendre garde, en théorie quantique des champs.

Challenge 235, page 207: Il est *faux* que « tous les crétois mentent », puisque le contraire, à savoir « certains crétois disent la vérité » est vrai dans cette situation précise. Le piège est que le contraire de la phrase d'origine est généralement, mais *à tort*, supposée être « tous les crétois disent la vérité ».

Challenge 236, page 207: Cette phrase ne peut pas être fausse, à cause de sa première partie et de la condition « ou ». Puisqu'elle est vraie, la deuxième partie doit être vraie et donc vous êtes un ange.

Challenge 240, page 208: Nous pouvons en débattre, dans tous les cas nous savons de manière irrévocable que ces deux affirmations sont des mensonges, comme indiqué à la page **??**.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 246, page 209: Le récit de cette ampoule semble être exact. L'ampoule éclaire très faiblement, de telle sorte que le fil ne s'évapore pas.

Challenge 247, page 209: Cette origine semble remonter au nombre de personnes présentes au dernier repas de Jésus dans le Nouveau Testament, ou le 13ème signe manquant du zodiaque. Il n'y a aucune valeur de vérité dans cette superstition. En réalité, chaque superstition est un mensonge. Cependant, prenez garde aux individus qui sont jaloux de ceux qui ne s'embarassent pas avec des superstitions, et qui manifestent une réaction violente.

Challenge 248, page 209: Sans exceptions jusqu'à présent, tous ceux qui ont prétendu avoir été stigmatisés avaient des plaies dans la *paume* de leurs mains. Cependant, lors de la crucifixion, les clous furent enfoncés à travers les *poignets*, parce que des clous fixés dans les paumes ne peuvent pas supporter le poids d'un corps humain : les paumes se seraient déchirées.

Challenge 249, page 210: Le mot « multivers » est à la fois une croyance et un mensonge.

Challenge 251, page 210: Par rapport à quel référentiel ? Comment ? Méfiez-vous de quiconque vous prononcerait cette affirmation : c'est un imposteur.

Challenge 252, page 216: Seule l'induction logique nous permet de faire usage des similitudes et donc de définir des concepts.

Page ?? **Challenge 254**, page 219: Oui, comme nous l'apprendrons.

Challenge 255, page 219: Oui, car l'observation implique l'interaction.

Challenge 256, page 220: L'absence de contradictions intrinsèques implique qu'un concept est valide en tant qu'outil de pensée. Puisque nous utilisons nos réflexions pour décrire la nature, l'existence mathématique est une version particulière de l'existence physique, car la pensée est elle-même un processus naturel. En vérité, les concepts mathématiques sont également pertinents pour la description du fonctionnement des ordinateurs et ainsi de suite.

Une autre manière de souligner cette idée consiste à faire remarquer que tous les concepts mathématiques sont bâtis à partir des ensembles et des relations, ou de certaines généralisations appropriées de ceux-ci. Ces briques fondamentales sont prélevées dans notre environnement physique. Parfois cette idée est exprimée d'une manière différente : de nombreux mathématiciens ont reconnu que certains concepts mathématiques, comme les entiers naturels, sont directement issus de l'expérience.

Challenge 257, page 220: Des spécimens en sont Achille, Ulysse, Mickey Mouse, les dieux du polythéisme et des esprits.

Challenge 259, page 222: Torricelli fit le vide dans un tube en verre en forme de U, en employant du mercure, le même métal liquide utilisé dans les thermomètres. Pouvez-vous imaginer comment ? Une question plus ardue : où a-t-il pu se procurer du mercure ?

Challenge 260, page 223: On peut toujours permettre de proférer que quelque chose est infini, si l'affirmation est réfutable. Par exemple, la phrase « Il y a un nombre infini de moustiques ».

D'autres propositions ne sont pas réfutables, comme « L'Univers se poursuit à l'infini derrière l'horizon ». Une telle affirmation est une croyance, et non pas une réalité.

Challenge 261, page 226: Ils ne sont pas non plus des ensembles et donc pas des collections de points.

Challenge 262, page 226: Il n'existe toujours pas de possibilité d'interagir avec toute la matière et l'énergie, puisque nous en faisons partie.

Challenge 263, page 232: Non. Il n'y a qu'une généralisation qui englobe les deux.

Challenge 264, page 233: Une interprétation de l'Univers n'est pas possible, car le mot interprétation requiert la possibilité de discuter d'un système si nous sommes à l'extérieur de celui-ci. L'Univers n'est pas une partie d'un ensemble plus vaste.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 265, page 233: Ces deux aspects peuvent en fait être vus comme les deux facettes du même argument : il n'y a pas d'autres choix, il n'y a qu'une seule possibilité. L'ensemble de la nature montre qu'il doit en être ainsi, car toutes les choses dépendent des autres.

Challenge ??, page ??: $|z|^2$ est le *déterminant* de la matrice $z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$.

Challenge ??, page ??: Utilisez l'argument de la diagonale de Cantor, comme dans le défi 218.

Challenge ??, page ??: Toute rotation d'un angle 2π est décrite par -1. Seule une rotation de 4π est décrite par $+1$, les quaternions décrivent vraiment les spineurs.

Challenge ??, page ??: Vérifiez simplement ce résultat composante par composante. Lisez aussi la référence citée.

Challenge ??, page ??: Pour qu'un entier de Gauss $n + im$ soit un nombre premier, l'entier $n^2 + m^2$ doit être premier, et de surcroît, une condition sur n mod 3 doit être vérifiée : laquelle et pourquoi ?

Challenge ??, page ??: Cette métrique est régulière, positive, définie et vérifie l'inégalité triangulaire.

Challenge ??, page ??: La réponse est l'ensemble de toutes les matrices deux par deux, puisque chaque matrice deux par deux détermine une transformation linéaire, si nous définissons un point transformé comme étant le produit de ce point par cette matrice. (Seule la multiplication avec une matrice donnée peut représenter une transformation linéaire.) Pouvez-vous identifier à partir d'une matrice si elle représente une rotation, une réflexion, une dilatation, une troncature ou un étirement le long de deux axes ? Quelles sont les autres possibilités ?

Challenge ??, page ??: Le produit (le plus simple) entre deux fonctions est représenté par la multiplication point à point.

Challenge ??, page ??: La norme $\|f\|$ d'une fonction réelle f est définie comme étant la borne supérieure de ses valeurs absolues :

$$\|f\| = \sup_{x \in \mathrm{R}} |f(x)| \,. \tag{102}$$

En termes simples : la valeur maximale prise par la valeur absolue de la fonction représente sa norme. Elle est également appelée norme « sup ». Parce qu'elle contient une borne supérieure, cette norme est définie uniquement sur le sous-espace des fonctions continues *bornées* sur un espace X, ou, si X est compact, sur l'espace de toutes les fonctions continues (car une fonction continue sur un espace compact doit être bornée).

Challenge ??, page ??: Sortez la tête de votre pull, puis tirez un côté de celui-ci vers le bras correspondant, continuez à le tirer sur l'autre bras. Tirez alors l'autre côté, sous le premier, vers l'autre bras également. Replacez votre tête. Votre pull (ou votre pantalon) sera à l'envers.

Challenge ??, page ??: La transformation d'une variété vers une autre ayant une topologie distincte peut être réalisée avec un changement infinitésimal, en ce que nous appelons un *point singulier*. Puisque la nature révèle une action minimale, on ne peut pas rendre un tel changement infinitésimal nul.

Challenge ??, page ??: Le produit $M^\dagger M$ est hermitien, et possède des valeurs propres positives. Donc H est défini de manière unique et est hermitien. U est unitaire parce que $U^\dagger U$ est la matrice unité.

Challenge 269, page 246: Les limites de Planck peuvent être dépassées pour des observables étendues pour lesquelles des systèmes à nombreuses particules peuvent dépasser les limites d'une particule unique, comme la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ou la résistance électrique.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Challenge 273, page 251: N'oubliez pas la dilatation relativiste du temps.

Challenge 274, page 251: Environ 10 µg.

Challenge 275, page 251: Puisque la température du point triple de l'eau est fixée, la température du point d'ébullition est également figée. Historiquement, la valeur du point triple n'a pas été convenablement choisie.

Challenge 276, page 252: Il est probable que la quantité ayant la plus grande variation soit la masse, où un préfixe pour $1\,\mathrm{eV/c^2}$ serait utile, de même que pour la masse totale présente dans l'Univers, qui est environ 10^{90} fois plus grande.

Challenge 277, page 253: La formule avec $n-1$ est un choix plus convenable. Pourquoi ?

Challenge 280, page 256: Non, seulement les propriétés des parties de l'Univers. L'Univers lui-même ne possède aucune propriété, comme indiqué à la page **??**.

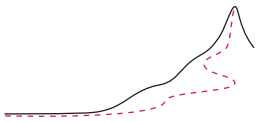
Challenge 281, page 258: Ce ralentissement progresse en *proportion quadratique* avec le temps, parce que chaque nouveau ralentissement s'ajoute au précédent !

Challenge 282, page 260: Le double de ce nombre, le nombre constitué de la suite de tous les nombres pairs, etc.

Challenge 285, page 282: Cela pourrait être résolu avec une astuce similaire à celle utilisée pour l'irrationalité de chacun des deux termes de la somme, mais personne n'en a décelée une.

Challenge 286, page 282: Il y a toujours de nombreuses découvertes qui attendent d'être révélées en mathématiques modernes, particulièrement en topologie, en théorie des nombres et en géométrie algébrique. Les mathématiques ont un avenir radieux.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



CRÉDITS

Remerciements

Nombreux sont ceux qui ont su entretenir leur don de curiosité et qui ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Saverio Pascazio a été – présent ou non – une référence constante pour ce projet. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller et, avant toutes choses, ma femme Britta ont tous apporté de précieux conseils et encouragements.

De nombreuses personnes ont aidé ce projet grâce à leurs précieuses informations. Parmi les plus pertinentes, il y a celles de Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, les innombrables améliorations apportées par Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farinati, les nombreuses améliorations d'Eric Sheldon, les avis développés d'Andrew Young, l'aide persévérante et les conseils de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide considérable, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des renseignements importants ont été fournis par Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier, Peter Brown, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Sergei Kopeikin, et de nombreuses autres personnes qui souhaitent rester dans l'anonymat.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et Achim Blumensath sur les polices et la mise en page, et avec l'assistance répétée et précieuse de Donald Arseneau. L'aide provient également de Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

Toutes les illustrations et animations dans ce texte ont été mises à disposition par leurs détenteurs des droits d'auteurs. Je les remercie tous chaleureusement. Ils sont cités dans les sections des crédits photographiques et filmographiques. Plus particulièrement, Lucas Barbosa et José Antonio Díaz Navas ont produit des animations spécialement pour ce livre, et Luca Gastaldi, Antonio Martos et Ulrich Kolberg ont composé des images spécifiquement pour celui-ci. La mise en page et le design de ce livre sont dus à la consultation professionnelle de Ulrich Dirr. Les suggestions et l'assistance de ma femme Britta comptent également pour beaucoup dans le design de l'ouvrage et de son site Web.

Depuis Mai 2007, la Klaus Tschira Foundation supporte généreusement l'édition et la publication électronique du livre *Motion Mountain*.

Crédits filmographiques

Les animations d'une onde électromagnétique plane à la page 72 sont la propriété de Thomas Weiland qui les a aimablement fournies et sont tirées de son site Web www.temf.de de la Technische Universität Darmstadt. L'animation du champ électromagnétique émis par une charge qui oscille à la page 85 est aimablement accordée et est la propriété de Daniel Schroeder. Il la déposera un jour sur sa page Web physics.weber.edu/schroeder/mrr/MRRtalk.html.

Crédits photographiques

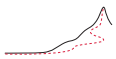
La photographie de l'effet excercé sur l'eau par un peigne frotté à la page 15 est aimablement fournie et appartient à Robert Fritzius, on la retrouve sur son site Web http://www.datasync.com/~rsf1/fun/bend-w.htm. La photographie de l'éclair à la page 18 est la propriété de Steven Horsburgh (voir www.horsburgh.com) et est reproduite ici avec sa permission. La photo du générateur de Kelvin à la page 19 est aimablement fournie et est protégée par Harald Chmela, elle est issue de son site Web www.hcrs.at. La photographie du grand requin blanc à la page 22 est protégée et est aimablement accordée par Klaus Jost, on la retrouve sur son magnifique site Web www.jostimages.com. Les images de l'expérience de la conservation de la charge électrique à la page 22 et celle du four chauffé au rouge à la page 121 sont sous la protection des droits d'auteurs et sont aimablement fournies par Wolfgang Rueckner. La photographie de *M. bavaricum* à la page 31 est la propriété de Marianne Hanzlik et est aimablement fournie par Nicolai Petersen. Les images de la bobine de Tesla à la page 43 sont gracieusement fournies et sont la propriété de Robert Billon, on les retrouve sur son site Web f3wm.free.fr. La photo des cheveux électrifiés sur le terrain de jeu, à la page 44, est aimablement fournie et est la propriété d'Evan Keller, on la retrouve sur sa page Web www.flickr.com/photos/evanrkeller. La photographie de l'objet qui se soulève à la page 46 est gracieusement fournie et est la propriété de Jean-Louis Naudin, vous pouvez trouver plus d'informations sur son site Web www.jlnlabs.org. La reproduction de la forme des océans à la page 47 est gracieusement accordée par Stefan Maus, elle est tirée de son site web www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/SatMag/ocean_tides.html. La photo du moteur élémentaire à la page 48 est la propriété de Stefan Kluge, qui l'accorde gracieusement. La photographie du prisme aux pages 71 et 98 est de Susan Schwartzenberg et est la propriété de l'Exploratorium qui l'accorde gracieusement, on la retrouve sur www.exploratorium.edu. L'image de l'arc-en-ciel à la page 64 est issue du site Web de la NOAA. L'image de l'arc-en-ciel secondaire à la page 74 est aimablement accordée et est la propriété d'Antonio Martos. Les photographies des systèmes de commande à

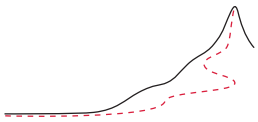
La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

distance magnifiquement simples indiquées à la page 73 sont la propriété et sont aimblement fournies par Guido Pegna, on les retrouve aussi sur son site Web www.pegna.com. L'image des arcs surnuméraires à la page 74 est aimablement fournie, est la propriété de Wolfgang Hinz et est tirée de son site Web www.meteoros.de. La figure d'interférence à la page 75 est la propriété et est gracieusement accordée par Rüdiger Paschotta, on la retrouve dans son encyclopédie libre sur le laser sur www.rp-photonics.com. La photographie composite de l'arc-en-ciel visible et infrarouge à la page 76 est aimablement fournie et est la propriété de Stefan Zeiger, on la retrouve dans sa collection www.photo.net/photodb/member-photos?include=all&user_id=439012. Les photographies de la biréfringence à la page 77 sont protégées et aimablement fournies par Roger Weller, d'après son site Web skywalker.cochise.edu/wellerr/mineral/calcite/calcite1.htm, Brad Amos, d'après son site Web homepage.ntlworld.com/w.amos2/BradAmos' sWebsite, et Martin Pietralla, d'après son support de cours. La photo du point de Poisson à la page 91 est gracieusement fournie et est la propriété de Christopher Jones, elle est tirée de son site Web www.union.edu/PUBLIC/PHYDEPT/jonesc/scientific_photos.htm. La photographie d'un mirage supérieur à la page 92 est aimablement accordée, est la propriété de Thomas Hogan et on la retrouve sur son site Web home.centurytel.net/Arkcite/looming.htm. La photographie d'un mirage inférieur à la page 92 est aimablement accordée, est la propriété d'Andy Barson et on la retrouve sur son site Web www.andybarson.co.uk. La photographie du four solaire à la page 92 est aimablement fournie et est la propriété de Gerhard Weinrebe. La photo de la comète McNaught à la page 94 est aimablement fournie et est protégée par Flagstaffotos. La photographie du rayon vert solaire à la page 99 est aimablement fournie, est la propriété d'Andrew Young et fait partie de son vaste site Web fascinant mintaka.sdsu.edu/GF ; la photographie du rayon vert lunaire est gracieusement accordée et est la propriété de Laurent Laveder, elle est tirée de son magnifique site sur www.PixHeaven.net. L'image de l'eau laiteuse à la page 100 a été réalisée pour ce livre et est la propriété d'Antonio Martos. La photographie de l'arc blanc à la page 101 est aimablement fournie et est la propriété de Michel Tournay, on peut la retrouver sur sa page Web www.spacew.com/gallery/Micheltournay. La photographie de l'arc-en-ciel fendu à la page 101 est gracieusement accordée et est la propriété d'Eva Seidenfaden, on peut la retrouver sur son site Web www.paraselene.de. La photographie de l'arc-en-ciel à six bras à la page 101 est aimablement fournie et est la propriété de Terje Nordvik, on peut la retrouver sur teronor@online.no et sur antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap070912.html. La photo de la parhélie à la page 102 est gracieusement accordée, est protégée par Phil Appleton et on la retrouve sur la page Web www.astronet.ru/db/xware/msg/1174325/solsticehalo_appleton.jpg.html. La photographie infrarouge à la page 113 est protégée et aimablement accordée par Serge Augustin. Les images des rétines à la page 114 sont la propriété d'Austin Roorda qui les accordent gracieusement. L'image du microscope à la page 118 est la propriété et est aimablement fournie par Stefan Hell. Les images exhibant le daltonisme à la page 122 sont la propriété et sont aimablement fournies par Michael Douma, elles sont tirées de son splendide site Web sur webexhibits.org/causesofcolor/2.html. Les photographies de nuages à la page 128 sont aimablement accordées par la NASA. Les images des nuages de plasma produits en laboratoire, qui ressemblent aux boules de feu, à la page 130 sont aimablement fournies et sont la propriété de Sergei Emelin et Alexei Pirozerski et sont issues de leur site Web balllightning.narod.ru. Les représentations de l'intérieur de la Terre à la page 132 sont protégées par les droits d'auteur et sont aimablement fournies par MPI-Chemie, Mainz/GEO, et peuvent être trouvées dans la brochure située sur www.mpch-mainz.mpg.de/mpg/deutsch/Panels_B.pdf. Elles sont gracieusement fournies par Mirjana Kotowski. Les portraits historiques des physiciens, reproduits dans ce livre ne sont pas protégés par des droits d'auteur, sauf lorsque cela est mentionné. Tous les schémas qui ne sont pas explicitement mentionnés sont protégés par le droit d'auteur © 1997 – 2010 de Christoph Schiller. Si vous soupçonnez qu'un droit d'auteur est attribué ou obtenu de manière incorrecte, cela n'est pas intentionnel et vous êtes aimablement invités à en faire part à l'auteur.

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010





INDEX DES NOMS

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où la personne est présentée plus en détail.

A
Abbott, T.A. 271
Abe, E. 273
Acef, O. 264
Ackermann, Peter 280
Adams, Douglas 228
Adenauer, Konrad 208
Advantest 22
Aguirregabiria, J.M. 269, 287
Aitken, M.J. 273
Ajdari, A. 273
Akerboom, F. 265
Al-Dayeh, M. 270
al-Farisi, Kamal al-Din 98
al-Hadi al-Hush, Ramadan 240
Allen, L. 266
Allen, Les 265
Almeida, C. de 271
Amos, Brad 77, 302
Ampère, André-Marie 33, 40
Anaxagore 226, 240
Anderson, James A. 275
Appleton, Phil 102, 302
Arago, Dominique-François 31, 91
Arago, François 91
Aripov, Otanazar 240
Aristote 218, 222
Arlt, J. 265
Armstrong, Neil 265
Aronson, Jeff 300
Aronson, Jeff K. 280
Arseneau, Donald 300
Ascher, Marcia 186
Ashburner, J. 276
Ashcroft, Neil 145
Ashkin, A. 265
Ashkin, Arthur 95
Ata Masafumi 300
Audoin, C. 280
Augel, Barbara et Edgar 300
Augustin d'Hippone 42
Augustin, Serge 113, 302
Avron, J.E. 269

B
Babinet, Jacques *242*
Baez, John 300
Bagnoli, Franco 300
Balashov, Yuri I. 279
Bandler, Richard 161, 199, 274
Barberi Gnecco, Bruno 300
Barbosa, Lucas 301
Barnett, S.J. 262
Barnhill, M.V. 262
Barrow, John D. 279
Barson, Andy 92, 302
Bartel, Elmar 300
Barwise, J. 278
Basieux, Pierre 276
Bauer, O. 266
Bauerecker, S. 271
Bautista, Ferdinand 300
Beale, I.L. 263
Beaty, William 300
Beeksma, Herman 300
Beenakker, C.W.J. 264
Belfort, François 300
Belic, D. 281
Bellac, M. Le 263
Bellini, Giovanni 268
Benbrook, J.R. 270
Benjamin, J. 279
Bennett, C.H. 273, 275
Berg, E. 269
Bergmann, L. 278
Bergquist, J. 281
Bering, E. 270
Bering, E.A. 270
Berkeley, George 220
Berlekamp, E.R. 277
Berlin, Brent 266
Bernstein, Aaron 86
Berry, M.V. 272
Beth, R.A. 266
Bettelheim, Bruno 275
Bettermann, D. 272
Beuys, Joseph 165, 237, 279
Beyer, Lothar 300
Bhalotra, S.R. 265
Biggar, Mark 300
Billon, Robert 43, 301
Biraben, F. 264
Bird, D.J. 280
Bjorkholm, J.E. 265
Blair, D.G. 281
Blanché, Robert 277
Bliss, G.W. 271
Blumensath, Achim 300
Boamfa, M.I. 271
Bohr, Niels 191
Bombelli, Luca 300
Boone, Roggie 300
Born, Max 265

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

B

BOUR

Bour, L. 264
Bowlby, John 278
Boyda, E.K. 265
Brandes, John 300
Brandt, E.H. 271
Brebner, Douglas 300
Brillouin, Louis 266
Broch, Henri 277
Brock, J.B. 267
Brody, A.L. 265
Brookshear, J. Glenn 275
Brown, B.L. 265
Brown, Peter 300
Bruce, Tom 300
Brunner, H. 263
Buchanan, Mark 272
Buchmann, Alfons 300
Buddakian, R. 273
Budney, Ryan 300
Burbridge, E. Margaret 279
Burbridge, G.R. 279
Butler, Samuel 160
Butoli, André 261
Böhncke, Klaus 300

C

Caloz, C. 268
Cantor, Georg 184
Caraway, E.L. 270
Carlip, Steve 300
Carmona, Humberto 272
Carr, Jim 300
Carroll, Lewis 277
Carter, Brandon 279
Celsius, Anders 251
Chaitin, Gregory J. 278
Chandrasekhar, Subramanyan 234
Chang, P.Z. 271
Chaplin, Charlie 64
Charpak, G. 280
Chiao, R. 267
Chiao, R.Y. 267, 268
Chiba, D. 273
Chmela, Harald 19, 22, 301
Chomsky, Noam 207
Christian Œrsted, Hans 32
Chu, S. 265, 267
Chuang, I.L. 267
Chudnovsky, D.V. 282
Chudnovsky, G.V. 282
Cicero, Marcus Tullius 236
Clairon, A. 264
Codling, K. 280
Coehoorn, Reinder 273
Cohen, P. J. 276
Cohen, Paul 276
Cohen, Philip 269
Colazingari, Elena 300
Conroy, R.S. 265
Conti, Andrea 300
Conway, J.H. 277
Conway, John 189, 295
Conway, John H. 277
Copernic, Nicolas 279
Copperfield, David 137, 293
Corballis, M.C. 263
Corbin, V. 270
Corovic, Dejan 300
Cosman, E.C. 264
Couder, Y. 277
Coulomb, Charles-Augustin de 23
Cowley, Les 266
Crescimanno, M. 262
Crespi, Roberto 300
Crinion, J.T. 276
Crookes, William 94
Crystal, David 174
Cummer, S.A. 268

D

d'Aquin, Thomas 223, 276
Dahlman, John 300
Dalton, John 122
Danecek, Petr 300
Darley, Vincent 301
Darre, Daniel 300
Darwin 202, 205, 219
Darwin, Charles 274
Davidhazy, Andrew 113
Davis, Chandler 240
Davson, H. 277
Davy, Humphry 32
de deutérium, fluorure 121
Deaver, B.S. 254
Decker, Rick 275
Dehmelt, H. 272
Dehmelt, Hans 271
Dekker, J.P. 273
DeRaad, L.L. 261
Descartes, René 279
Descartes, René 162
Desmet, S. 261
DeTemple, D.W. 282
de Maricourt, Pierre 30
Dholakia, K. 265, 266
Diana, princesse de Galles 203
Dietl, T. 273
Dietrich, F. 272
Diez, Ulrich 301
DiFilippo, Frank 300
Dirac 213, 233
Dirr, Ulrich 301
Dobra, Ciprian 300
Dogarin, A. 267
Douady, S. 277
Douglas, R. 275
Douma, Michael 122, 302
Dragon, Norbert 300
Dresden, M. 278
Drude, Paul 125
Duhem, Pierre 277
Dumont, Jean-Paul 279
Dwyer, J.R. 270
Dyson, Freeman 300
Dziedzic, J.M. 265
Díaz Navas, José Antonio 301
Démocrite 206, 218, 222, 279
Díaz Navas, José Antonio 79

E

Ebstein, R.P. 279
Eccles, John 279
Economou, E.N. 267
Eddington, Arthur 224, 279
Edge, Ron 272
Edwards, R. 261
Egorov, A.E. 270
Egorov, A.I. 270
Egorov, Anton 131
Ehrenstein, W.H. 269
Eigler, D.M. 269
Einstein, A. 262
Einstein, Albert 64, 167, 192, 240
Els, Danie 301

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

E

ELSWIJK

Elswijk, H.B. 262
Elswijk, Herman B. 300
Emelin, Sergei 130, 300, 302
Emerson, Ralph Waldo 178
Enders, A. 268
Epikuros 237
Erlykin, A.D. 269
Ertmer, W. 272
Etchemendy, J. 278
Euler, Leonhard 194
Everitt, C.W. 254
Exploratorium 71, 98, 301

F
Fabeni, P. 268
Fairbank, W.M. 262
Fairbanks, J.D. 254
Fang Lizhi 240
Faraday, Michael 32, 37, 39, 47, 48
Farinati, Claudio 300
Fermani, Antonio 300
Few, A.A. 270
Feyerabend, Paul 206, 230
Feynman, Richard 69
Feynman, Richard P. 211
Finkelstein, D. 270
Finkenzeller, Klaus 300
Fischer, Ulrike 300
Flagstaffotos 94, 302
Flavell, J. H. 163
Fortey, Richard 274
Foteinopoulou, S. 267
Fowler, W.A. 279
Fowler, Willy 234, 279
Frackowiak, R.S. 276
Fraenkel, Adolf/Abraham 182
Franklin, Benjamin 19, 20
Frasinski, L.J. 280
Fraunhofer, Joseph 74
Freiberg, Dietrich von 266
French, A.P. 269
Fresnel, Augustin Jean 74, *91*
Friese, M.E.J. 266
Fritzius, Robert 15, 301
Fumagalli, Giuseppe 279
Furrie, Pat 300
Föppl, H. 266
Füllerkrug, M. 270

G
Gödel, Kurt 206, 207
Gabor, Dennis 116
Galajda, P. 265
Galilei, Galileo 88, 222, 227, 240
Gallivan, B.C. 276
Galvani, Luigi 29
Gans, R. 272
Garcia-Ruiz, J.M. 277
Gardner, Martin 278
Garlaschelli, L. 277
Garwin, R.L. 280
Gastaldi, Luca 301
Geim, A.K. 271, 272
Geim, Andre 272
Gennes, Pierre-Gilles de 279
GEO 132, 302
Georgi, Renate 279, 300
Gibbons, Gary 300
Gibbs, Phil 265
Gilbert, William 16
Gilles, G.T. 263
Glassey, Olivier 300
Glatzmaier, G.A. 263
Gleiter, H. 273
Goldhaber, A.S. 261
Goldsmith, D. 269
Gonshor, H. 277
González, Antonio 300
González-Herráez, M. 267
Gordon, A. 269
Gould, Stephen J. 274
Graham, George 42
Grahn, Alexander 301
Grandjean, F. 261
Grant, E. 268
Grebe-Ellis, J. 264
Greegor, R.B. 267
Greenler, R. 265
Greenler, Robert 265
Gregorio, Enrico 301
Greiner, Jochen 300
Griessen, R. 273
Griffiths, D.J. 271
Grimaldi, Francesco 89
Grimes, Barbara 176
Groot, D.G. de 273
Gross, B. 264
Gurevich, A.V. 270
Guy, R.K. 277
Gácsi, Zoltán 300
Gál, J. 264
Gödel, Kurt 276

H
Haas, W.J. de 262
Haas, Wander Johannes de 34
Haber, John 300
Hadamard, Jacques 279
Haeckel, Ernst 199
Haerendel, G. 266
Haidinger, W.K. 264
Haidinger, Wilhelm 77
Hakonen, P.J. 280
Haley, Stephen 137, 300
Hallam, Tony 273
Hamblyn, Richard 270
Hamilton, William 178
Hanzlik, Marianne 31, 301
Hardcastle, Martin 300
Hardin, C.L. 266
Hardy, Godfrey H. 201
Harlen, V. 275
Harrington, R.F. 262
Hasselberg, Ernst von 195
Hatcher, W.S. 276
Haubrich, D. 272
Hausch, T.W. 264
Hausherr, Tilman 293, 300
Hayes, Allan 300
Heaviside 53
Heckenberg, N.R. 266
Heflinger, L.O. 272
Heisenberg 213
Heisenberg, Werner 88
Hell, S.W. 269
Hell, Stefan 118, 302
Hellinger, Bert 201, 239
Hellwege, K.-H. 278
Helmholtz 74
Helmholtz, Hermann *112*
Helmholtz, Hermann von 238
Helmond, Tom 300
Henderson, Paula 300
Hentig, Hartmut von 7
Heras, J.A. 262
Hermann, Ludimar 110

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

H

HERNANDEZ

Hernandez, A. 269, 287
Hersch, R. 276
Hersch, Reuben 182
Herschel, William 75
Hertz 53
Hertz, Heinrich Rudolf *71*
Hertz, J. 166
Hertzlinger, Joseph 301
Heumann, John 300
Higashi, R. 281
Hilbert, David 192, 193, 207
Hilico, L. 264
Hiller, R.A. 273
Hillman, Chris 300
Hinz, Wolfgang 74, 302
Hirshfield, Stuart 275
Hitler, Adolf 119
Hoekstra, Rolf F. 274
Hoffman, Donald D. 275
Hogan, Thomas 92, 302
Hohenstatt, M. 272
Hones, Bill 272
Hong, F.-L. 281
't Hooft, Gerard 200
Hooft, G.W. 't 264
Hopfield, J.J. 275
Horgan, John 278
Horsburgh, Steven 18, 301
Horváth, G. 264
Houck, A.A. 267
Houdini, Harry 277
Howard, Luke 127
Hoyle, F. 279
Hoyle, Fred 234
Htun, Bo Bo 240
Hu, Z. 272
Huber, A. 264
Huber, Daniel 300
Huiberts, J.N. 273
Humboldt, Alexander von 292
Huppertz, H. 273
Huygens, Christiaan 73
Hypatie 174, 206, 240
Höfner, H. 266

I

IEEE 106
Illich, Ivan 235
Irving, Washington 210
Irwin, Jim 265
Itano, W.M. 272
Itoh, T. 268
Ivanov, Igor 300

J

Jackson, J.D. 261, 262
Jackson, L. 274
Jaencke, Peter 278
Jalink, Kim 300
Jamil, M. 300
Janek, Jürgen 300
Jeanloz, R. 263
Jensen, P. 278
Jeon, H. 261
Jerauld, J. 270
Johansson, Mikael 300
Jones, Christopher 91, 302
Jones, Gareth 281
Jones, P.D. 273
Jones, Quentin David 300
Jones, T.B. 271, 272
Jones, Tony 280
Jong, Marc de 300
Jordan, D.M. 270
Jost, Klaus 22, 301
Jozefowski, L. 264
Ju, L. 281
Julien, L. 264
Justice, B.J. 267

K

Köppe, Thomas 300
Kanada Yasumasa 282
Kant, Emmanuel 123, 179
Katori, H. 281
Kay, Paul 266
Keesing, R.G. 281
Keller, Evan 44, 301
Keller, Wilfred 296
Kelly, K.L. 264
Kelu, Jonatan 300
Kepler, Johannes 94
Kerr, John *80*
Kettering, C.F. 261
Kim Song-Man 240
Kimble, H.J. 272
Kiss, Joseph 300
Klaus Tschira Foundation 301
Klein, Felix 194
Kleinert, F. 278
Kluge, Stefan 48, 301
Knuth, D. 277
Knuth, Donald 189
Koch, Robert 236
Koeman, N.J. 273
Kohlrausch, Friedrich 278
Kolberg, Ulrich 301
Koltenbah, B.E.C. 267
Koolen, Anna 300
Koomans, A.A. 262
Kopeikin, Sergei 300
Kostiuk, L.W. 263
Kotowski, Mirjana 302
Kovetz, A. 271
Kowalski, L. 269
Kozhekin, A.E. 267
Kramer, D. 273
Krider, E.P. 261
Krijn, Marcel 300
Krogh, A. 166
Kruskal, Martin 189
Królikowski, Jarosław 300
Krüger, Reinhard 210
Kubala, Adrian 300
Kuerti, G. 268
Kurizki, G. 267
Kusch, K. 274
Kusch, S. 274
Kuzin, Pavel 300
Kuzmich, A. 267
Kwait, P.G. 267
Kwiat, P.G. 268
Kwok, D.Y. 263

L

Lai, A. 268
Landauer, R. 275
Landolt-Börnstein 278
Lang, N.D. 269
Larousse, Pierre 277
Latham, J. 270
Laveder, Laurent 99, 302
Lavoisier, Antoine 240
Lebedew, P. 265
Lebedew, Pyotr/Peter 95
Ledoux, Joseph 275
Leeuwenhoek, Antoni Van 89

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

L

LEIGHTON

Leighton, R.B. 285
Lennie, P. 269
Leone, F.C. 268
Lepak, J. 262
Leucippe 222
Li, K. 267
Li, Y.C. 271
Lichtenberg, Georg Christoph 235
Lincoln, Abraham 240
Linde, Johan 301
Lingelbach, B. 269
Lingelbach, Elke 110
Lintel, Harald van 300
Lipperhey, Johannes 88
Liu Gang 240
Livingston, William 266
Loidl, J. 266
Lombard, Pierre 276
Lombardi, Luciano 300
Longo, M. 261
Lorentz, Hendrik Antoon 36
Lovell, Jim 265
Lu, F. 263
Luca Bombelli 300
Luo, J. 263
Lynch, D.K. 269
Lénine 32
Lévy-Leblond, J.-M. 263
Lévy-Leblond, Jean-Marc 261
Lühr, H. 263

M

Maan, Jan Kees 272
Macdonald, Malcolm Ross 274
Madelung, O. 278
Maeterlink, Maurice 226
Maffi, Luisa 266
Mahoney, Alan 300
Mahowald, M. 275
Main, Peter 272
Malus, Louis 76
Manly, Peter 88
Mark, Martin van der 300
Martikainen, J.E. 280
Martin, S. 273
Martos, Antonio 74, 100, 300–302
Massa, Corrado 300
Matsukura, F. 273
Matthews, Robert 296
Maus, S. 263
Maus, Stefan 47, 301
Maxwell 26, 213
Maxwell, James Clerk 53
Mayer, N.J. 274
Mayné, Fernand 300
Mayr, Peter 300
McCullogh 268
McCuskey, S.W. 268
McGuire, Bill 273
McQuarry, George 300
McTaggart 201
Mechelli, A. 276
Meetz, Kurt 263
Melzner, F. 266
Mendes, O. 271
Mermin, David 108, 145
Merrit, John 300
Meschede, D. 272
Metha, A. 269
Michaelson, P.F. 254
Michelson, Albert 157
Millikan 292
Milton, K.A. 261
Minnaert, Marcel 266
Mission, G.P. 264
Mock, J.J. 267
Mohr, P.J. 281
Molière 235
Montgomery, H. 263
Montie, E.A. 264
Montonen, Claus 66
Moon, F.C. 271
Moortel, Dirk Van de 300
Moothoo, D.N. 265
Moser, Lukas Fabian 300
Mozart 238
MPI-Chemie, Mainz 132, 302
Mugnai, D. 268, 269
Murdock, Ron 300
Murillo, Nadia 300
Musiol, Gerhard 272
Muynck, Wim de 300

N

Namouni, Fathi 300
Naudin, Jean-Louis 46, 301
Neidhart, B. 271
Neuhauser, W. 272
Neumaier, Heinrich 300
Neuss, H. 266
New, M. 273
Newton 252
Nez, F. 264
Nieminen, T.A. 266
Niepraschk, Rolf 301
Nieuwpoort, Frans van 300
Nimtz, G. 268
Nimtz, Günter 107
Noppeney, U. 276
Nordvik, Terje 101, 302

O

O'Connell, Sanjida 274
O'Doberty, J. 276
Oberdiek, Heiko 301
Oberquell, Brian 300
Œrsted 32
Offner, Carl 300
Ohm, Georg Simon 51
Ohno, H. 273
Ohno, Y. 273
Ohtani, K. 273
Olive, David 66
Omiya, T. 273
Oostrum, Piet van 300
Oppenheimer, Robert 240
Orban, F. 261
Ormos, P. 265
Osterle, Fletcher 50
Otto von Bismarck 197
Otto, Rudolf 237, 237

P

Padgett, M.J. 266
Padgett, Miles 265
Page, Don 300
Pahaut, Serge 300
Paine, Thomas 210
Pais, A. 277
Palmer, R. 166
Parazzoli, C.G. 267
Park, David 264
Parker, D.E. 273
Parks, David 300

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

P

PARROTT

Parrott, S. 271
Pascazio, Saverio 300
Paschotta, Rüdiger 75, 302
Pasi, Enrico 300
Paul de Tarse 207
Pauli, Wolfgang 202
Pavão, A.C. 271
Pazzi, G.P. 268
Pecharsky, Vitalij 273
Peeters, Bert 300
Pegna, Guido 73, 302
Peirce, Charles 174, 206
Pendry, J. 267
Pendry, J.B. 267, 268
Pendry, John 105, 106
Peng, J.L. 272
Penrose, Roger 278
Perini, Romano 300
Perse 226
Petersen, Nicolai 301
Philips 15
Phillips, Melba 240
Piaget, J. 163
Piaget, Jean 163
Picasso, Pablo 64, 170, 228
Pietralla, Martin 77, 302
Pinker, Steven 275
Pirozerski, Alexei 130, 302
PixHeaven.net 99
Planck, Max 119
Poincaré, Henri 238
Poisson, Denis 91
Popper, Karl 210, 277
Popper, Karl R. 279
Povinelli, D.J. 235
Poynting, J.H. 266
Poynting, John Henry 61
Prentiss, M. 265
Prevedelli, M. 264
Price, C.J. 276
Pritchard, Carol 300
Proença, Nuno 300
Protagoras 252
Purves, William 300
Pythagore 191, 192

R

Rahtz, Sebastian 301
Rakov, V.A. 270
Ramaccini, F. 277
Ramakrishna, S.A. 267
Rambo, K.J. 270
Randi, James 277, 278
Ranfagni, A. 268, 269
Rankl, Wolfgang 300
Rappmann, R. 275
Rassoul, H.K. 270
Reball, Siegfried 272
Rector, J.H. 273
Redondi, Pietro 300
Reichert, J. 264
Reichl, Linda 273
Renselle, Doug 300
Reppisch, Michael 300
Reynolds, Osborne 265
Richards, P.G. 271
Ridgeway, S.L. 272
Rieger, E. 266
Riemann, Bernhard *78*
Rigor, I.G. 273
Rikken, Geert 273
Rindler, Wolfgang 263
Ritter, Johann Wilhelm 75
Rivas, M. 269
Rivas, Martin 300
Roberts, P.H. 263
Robertson, Will 301
Rodgers, P. 272
Rodrigues, W.A. 269
Rohrlich, F. 271
Romanowicz, B. 263
Roorda, A. 269
Roorda, Austin 114, 302
Ruben, Gary 300
Rubinstein, J. 270
Rubinsztein-Dunlop, H. 266
Rucker, Rudy 184, 276
Rueckner, W. 261
Rueckner, Wolfgang 22, 121, 301
Ruggieri, R. 269
Rusby, R.L. 281
Rusby, Richard 281
Ruschewitz, F. 272
Russer, P. 268

S

S.R. Madhu Rao 300
Saa, A. 271
Sacks, Oliver 275
Sahl, Mort 235
Sakharov, Andrei 240
Salamo, G. 265
Salditt, T. 269
Salingaros, N. 262
Salman Salman 240
Sami Kilani 240
Sands, M. 285
Sassen, K. 266
Saussure, Ferdinand de 174
Scala, S. Della 277
Schadwinkel, H. 272
Schata, P. 275
Scheer, Elke 269
Schelby, R.A. 267
Schiff, L.I. 262
Schiller, Britta 300, 301
Schiller, C. 262
Schiller, Christoph 302
Schiller, Isabella 300
Schiller, Peter 300
Schiller, Stephan 300
Schilthuizen, Menno 274
Schlegel, K. 270
Schoeck, Helmut 280
Schroeder, Daniel 85, 301
Schrödinger 103, 213
Schultz, S. 267
Schurig, D. 267
Schwartzenberg, Susan 71, 98, 301
Schwinger, Julian *211*, 261
Schwob, C. 264
Schäfer, C. 278
Schönenberger, C. 262
Scott, G.G. 261
Scott, Jonathan 300
Scott, W.T. 271
Seeger, J. 269
Segev 91
Segev, M. 265
Segev, Mordechai 265
Seidenfaden, Eva 101, 302
Shabanov, G.D. 270
Shabanov, Gennady 131
Shankland, R.S. 268
Shaw, George Bernard 200

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

S

SHELDON

Sheldon, Eric 300
Shih, M. 265
Short, J. 281
Shulman, Polly 277
Siart, Uwe 301
Sierra, Bert 300
Simon, Julia 300
Simon, M.D. 271, 272
Simpson, N.B. 266
Singleton, D. 269
Singleton, Douglas 300
Sivardière, Jean 263
Slabber, André 300
Smirnov, B.M. 270
Smith, D.R. 267, 268
Smith, David 267
Smith, S.P. 265
Smith, Warren J. 270
Smullyan, Raymond 206
Soffer, B.H. 269
Sokolovskii, B.Yu. 270
Solomatin, Vitaliy 300
Sommerfeld, Arnold *104*, 266, 267
Song, K.-Y. 267
Song, X.D. 271
Soukoulis, C.M. 267
Sparenberg, Anja 273
Spieker, H. 268
Spitzer, Manfred 275
Staff, National Research Council 270
Starr, A.F. 268
Stearns, Stephen C. 274
Stedman, G.E. 281
Stegeman, George 265
Steinberg, A.M. 267, 268
Steinhaus 295
Stepanov, S. I. 270
Stepanov, S.I. 270
Stettbacher, J.K. 274
Stewart, I. 276
Stewart, Ian 277
Stewart, T. Dale 261
Stoney, G.J. 280
Stoney, George *28*
Stoney, George Johnston 246
Story, Don 301
Strauch, F. 272
Styer, D. 267
Stöcker, J. 266
Sun, X.L. 271
Surdin, Vladimir 269, 300
Swagten, Henk 273
Szczesny, Gerhard 278
Szilard, L. 275
Szilard, Léo 169, 170

T

Takamoto, M. 281
Tanielian, M. 267
Tarde, Gabriel *202*
Tarko, Vlad 300
Tarski, Alfred 277
Tauber, G.E. 271
Taylor, B.N. 281
Taylor, J.H. 250
Tegelaar, Paul 300
Terletskii, Y.P. 267
Tesla, Nikola *42*
Thaler, Jon 300
Thalès de Milet 15
Theodoricus Teutonicus de Vriberg 98
Thidé, Bo 57
Thies, Ingo 300
Thiry, Paul-Henri 239
Thober, D.S. 269
Thomas d'Aquin 187
Thomson (Kelvin), William *18*
Thomson, Joseph John 28
Thévenaz, L. 267
Tipler, Frank J. 279
Tomonaga 211
Torricelli, Evangelista 222
Toschek, P.E. 272
Tournay, Michel 101, 302
Townsend, Paul 300
Travis, J. 263
Trevorrow, Andrew 301
Trower, W.P. 261
Tsagas, C.G. 271
Tsai, W.Y. 261
Tu, L.-C. 263
Tuckermann, R. 271
Tuppen, Lawrence 300
Twain, Mark 201, 212, 235
Tyler, R.H. 263

U

Ucke, C. 289
Udem, Th. 264
Ueberholz, B. 272
Uguzzoni, Arnaldo 300
Ulysse 297
Uman, M.A. 270
Upright, Craig 301
Ustinov, Peter 64

V

Valanju, A.P. 267
Valanju, P.M. 267
Valenzuela, A. 266
Valsiner, Jaan 274
Valsinger, Jaan 274
Vanier, J. 280
Vannoni, Paul 300
Veer, René van der 274
Verne, Jules 99
Veselago, V.G. 267
Veselago, Victor 105
Vigotsky, Lev 163, 274
Virgile 231
Viswanath, R.N. 273
Voit, A. 265
Volin, Leo 300
Vollmer, G. 276
Vollmer, M. 266
Volta, Alessandro *44*
Voltaire 228, 239, 252, 261, 279
Voss, Herbert 301
Vuorinen, R.T. 280
Völz, Horst 280

W

Waldhauser, F. 271
Walker, J. 266
Walser, R.M. 267
Walter, H. 272
Wang Juntao 240
Wang, L.J. 267
Warkentin, John 301
Washizu, M. 272
Wehner, R. 264
Weiland, Thomas 72, 301
Weinrebe, Gerhard 92, 302
Weiss, Martha 300
Weisskopf, Victor 238

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

W

WEISSMÜLLER

Weissmüller, J. 273
Weitz, M. 264
Weizenbaum, Joseph 173
Weller, Roger 77, 302
Weninger, K. 273
Westphal, V. 269
Wheatstone, Charles 28
Whewell, William 47
Whitehead, Alfred North 215
Wiechert, Johann Emil 28
Wien, Wilhelm *120*
Wierda, Gerben 300
Wierzbicka, Anna 176, 198, 276, 300
Wigner, E.P. 263
Wigner, Eugene 191, 277
Wijk, Mike van 300
Wijngarden, R.J. 273
Wikell, Göran 277
Wilde, Oscar 164, 217
Wilk, S.R. 269
Williams, D.R. 269
Williams, David 114
Wiltschko, R. 262
Wiltschko, W. 262
Wineland, D.J. 272
Wise, N.W. 254
Witte, H. 268
Witteborn, F.C. 262
Wittgenstein, Ludwig 159, 174, 180, 191, 192, 196, 197, 208, 215, 217, 231, 278
Wolf, Emil 265
Wolf, R. 289
Wolfendale, A.W. 269
Wong, S. 267
Wood, B. 275
Wright, B. 270
Wright, Joseph 301
Wu, C. 272
Wu, T.T. 263
Wynands, R. 272
Würschum, R. 273

X

Xavier, A.L. 269
Xu Liangying 240

Y

Yamane, T. 265
Yang, C.N. 263
Yang, J. 263
Yazdani, A. 269
Young, A.T. 266
Young, Andrew 99, 266, 300, 302
Young, Thomas *74*

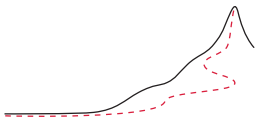
Z

Zaccone, Rick 301
Zalm, Peer 300
Zander, Hans Conrad 278
Zedler, M. 268
Zedler, Michael 300
Zeiger, Stefan 76, 302
Zeilinger, A. 280
Zeller, Eduard 279
Zermelo, Ernst 182
Zernike, Frits 117
Zhang, J. 271
Zhao, C. 281
Zimmer, P. 273
Zurek, W.H. 275
Zurek, Wojciech 170
Zweck, Josef 272
Zybin, K.P. 270

É

Épicure 237, 238

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



INDEX DES SUJETS

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où le mot-clé est défini ou présenté en détail. L'index des sujets joue donc le rôle d'un glossaire.

A

à condensateur, électromètre 44
a posteriori 179
a priori 179
à travers les vêtements, voir 81
abeilles communes 76
aberrations *89*
aberrations chromatiques *97*
absorption 142
absorption saturable 144
abstraction 185
accident dû à du matériau nucléaire ou à l'utilisation d'armes 154
accumulabilité 23
accélération de Laplace *36*
accélération de Lorentz *36*
achèvement de la science 223
acide sulfurique 141
acides aminés 142
action de miroir à conjugaison de phase 144
action du laser 144
action optique 142
action électro-optique 141
action électrolytique 141
activité magnéto-optique 140
activité optique *289*
additivité 23, 25, 35
ADN 83
ADN 168, 172, 188, 252
Afrique entre en collision avec l'Europe 155
AgBr 142
AgCl 75, 142
âge de la Terre 258
âge de la Voie lactée 259
âge du Soleil 259
âge glaciaire 154, 155
AgI 142
agroglyphes *208*
aimant 48
aimants *16*, 137
air 138
Al 139
Albert Einstein, jeune 86
albédo *93*
alimentation électrique, bruit 147
Allen, Woody 168
alliages métalliques 140
allume-gaz 72
aluminium 261
ambre *15*
amplification paramétrique 144
amplitude *70*
ampoules de Lorenzini *22*, *30*
ampoules électriques 109
ampère *241*
andalousite 142
ange, en êtes-vous un ? 207
anges 187
anglais, langue 176
anglais, taille de la langue 175
angle de mélange électrofaible 255
animisme 163
anisotropie optiquement induite 142
annihilation 139
année tropicale 256
année-lumière 256
anode 47
antenne, la plus simple 84
anti-gravité, dispositifs 137
aphélie *259*
apogée 258
Apollo 90
appareil photo, sacré 268
appauvrissement de l'oxygène 155
application *185*
apprentissage *166*
apprentissage, meilleure méthode 9
Ar 139
araignées 76, 88
arbre 187, 252
arbres et électricité 15
arc blanc *101*
arc-en-ciel 74, 89
arc-en-ciel apparié *101*
arc-en-ciel irrégulier *101*
arc-en-ciel, explication 98
arc-en-ciel, largeur 100
arc-en-ciel, polarisation 101
arcs électriques *20*
arcs-en-ciel surnuméraires 74
argent 20
argument *185*
armes avec la lumière 120
arséniure de gallium 138
articles de physique 108

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

A

ARTIFICIELS

artificiels, phénomènes 217
artéfact 242
ascenseurs 46
aspects de la nature *162*
astéroïde heurtant la Terre 155
atome unique 51
atto 243
attributs *176*
Au 139
au début 292
auréole *110*
autisme *162*, 274
autistes 274
autistique 162
auto-référentes *206*
avalanche électronique 127
aventures futures 154
axiome du choix 181, *182*
axiomes de la théorie des ensembles 181
axiomes ZFC de la théorie des ensembles 181

B

bain physique *169*
balayage pour l'imagerie *117*
baleines 171
BaO_2 139
barbier, paradoxe 194
$BaTiO_3$ 141
battements de cœur 188
batterie *44*
becquerel 243
Belgique 90
Belle au bois dormant, effet 86
Bi 140
bible 207, *213*
bibliothèque 108
biologistes de l'évolution 160
bioluminescence 143
BIPM 213, 241, 242
biréfringence *76*, 142
BiSb 140
BiSeTe 138
Bi_2Te_3 138
bits *167*
bière 144
blanc *118*
blasphèmes 228
bleu 82
bleu primaire 82
bobine Tesla 42
bobines Tesla 45
bouclage des cheveux 65
bougie 131
boules de feu *130*
Bourse 28
bremsstrahlung 143
brillant 187
brosse de Haidinger *78*
brosse de polarisation *78*
brouillard électromagnétique *146*
bruit *169*
Bureau International des Poids et Mesures 241
bâtonnets dans la rétine *115*, 188
Bételgeuse 156

C

$CaCO_3$ 76
CaF_2 143
cage de Faraday *146*
calcite 76, 77, 142
calorie *251*
candela *241*
canons magnétiques 45
canons électriques 45
canulars 90
cardinal *184*
cardinal inaccessible *184*
carré magique *194*
catastrophes 154
cathode 47
catégorie *179*, *185*
cause 235
CD 188
Cd 139
CdS 138, 144
CeB_6 139
CeF_3 140
cellule primaire *44*
cellule secondaire *44*
cellule voltaïque *44*
cellules 187
cellules photovoltaïques 142
centi 243
cerveau 134, 160, 188
cerveau de baleine 171
cerveau et Lune 234
cerveau, consommation d'énergie 172
cerveau, meilleur ouvrage sur le 262
champ de jauge *61*
champ de Poynting 69
champ magnétique *16*, *35*, 35
champ magnétique critique 17
champ physique *16*
champ radio *16*
champ électrique *16*, *23*
champ électromagnétique *16*, *37*, *38*, *61*
champ électromagnétique, linéarité *70*
champ électromoteur *55*
champs quasi statiques 80
chandelle 248
charbon 142
charge 152
charge du positron 254
charge électrique *19*
charge électrique est discrète *123*
charge électrique minimale 123
charge, quantité de *21*
charge, rayonnement dû à l'accélération 131
charge, rayonnement dû à la gravité 131
charlatans *179*, 217
chat 110
chevelue, sphère 287
cheveux 188
cheveux, bouclage 65
chimiluminescence 143
chiral *45*
chiralité 45
chlorophylle 231
chocolat et vitesse de la lumière 72
choix, absence au Big Bang *227*
chromosome 155
chromosome X et daltonisme

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

C

CIEL

122
ciel 144
cinésiologie 199
circonspection 258
cirrus *127*
classe 182
classificateurs *166*
classification *163*
clignements 188
clés à molette optiques *95*
CMOS 134
CO_2 155
Co 139
cobalt 16
CODATA 281
commande ping pour mesurer la vitesse de la lumière 28
Commission Internationale des Poids et Mesures 241
communication, supraluminique 107
communisme 32
comparaison avec un étalon de référence *212*
complexité « infinie » 229
complément d'objet *176*
complétude 23
composantes de Fourier *148*
compréhensibilité de l'Univers 225
comète 94
comète artificielle 96
comètes 265
concept *174*, *179*, *180*
concepts physiques, découverte des 199
concepts, a priori 163
condensateur 44, 149
conditions initiales *62*
conditions limites *63*
conductivité 138
Conférence Générale des Poids et Mesures 241, 252
conjectures *201*
connaissance *210*
conscience *236*
conservation 23, *227*
constante cosmologique 256
constante de Boltzmann *119*, 255
constante de couplage de Fermi 255
constante de couplage fort 255
constante de couplage gravit. 255
constante de Hubble 256
constante de la loi du déplacement de Wien 256
constante de Planck *119*
constante de Planck originale 254
constante de Planck réduite 254
constante de rayonnement de corps noir *146*
constante de rayonnement de corps noir de Stefan–Boltzmann *146*
constante de Rydberg 255
constante de Stefan–Boltzmann 256
constante de structure fine 66, 104, *244*, *255*, 255
constante magnétique 255
constante électrique 255
contacts ponctuels 50
continuité 23
continuum 25, 35
contraire *203*
Convention du Mètre 241
conversion de bits en entropie 256
coordonnées rationnelles 260
cornichon 109
cornée 78, 142
corps humain, émission de lumière 249
corps neutre *21*
corps noir *146*
corps noir, rayonnement 145
cosmonautes 89, 90
cosmos *161*
coucher du soleil 100
couleur 142
couleur, inventaire mondial 266
couleurs dans la nature 266
coulomb *21*, 243
Coulomb, force 25
couplage fort *287*
couple 35, *182*
courant électrique *20*
covariant *225*
Cr 139
cristallin 78
cristaux liquides 141
croyances *203*
croyances dans les concepts physiques 197
croûte terrestre *132*
création de paire 144
création est un type de mouvement *227*
créationnisme 205
créationnisme scientifique 205
Cs 142
$CsNO_3$ 141
Cu 139
cube magique *194*
cuisses de grenouilles 29
cuivre 20, 124, 126, 138
cumulonimbus *127*
cumulus *127*
cure-dent 131
curiosité *237*
câble électrique, élimination 45
célébrité, manière d'y parvenir 134
cônes dans la rétine 188

D

D4DR 279
daltonien *122*
daltonisme 122
datation au C14 273
de l'électron, spin 34
de vision nocturne, lunettes 249
degré Celsius 243
degré, unité d'angle *243*
densité baryonique 257
densité de photons 257
densité du flux magnétique 35
densité lumineuse *249*
densité moyenne de la Terre 258

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

D

DENTIFRICE

dentifrice 168
dents 147
dents, croissance 147
description *230*
dessein *229*
dessein intelligent 205, 229
deutan 122
diagonale de Cantor 295
dialogue homme–machine 173
diamagnétisme *34*, 139
diamant 138, 142
dichroïsme 140, 142
dichroïsme magnétique circulaire 140
dieux 157, 183, 204, 218, 220, 223, 228, 239
diffraction *89*
diffraction, limite 117
diffusion 91, 100, 144
diffusion de Mie 144
diffusion de Rayleigh 144
diminution de la couche d'ozone 154
dioptrie *289*
direction 25, 35
dirigeable 81
discernement 23, 25, 35
dispersion anormale 267
distance moyenne de la Lune 258
divines surprises 235
divinité 218
divinités 170
diélectricité 141
diélectriques *20*
doctrine *203*
doigts 73
doigts démontrent les propriétés ondulatoires de la lumière 73
domaine de définition *185*
dopamine 279
droitiers 64
dualité électromagnétique *66*
dynamos *37*
déca 243
déci 243
découverte des concepts physiques 199
défi, classement *9*
défi, le plus tenace de la science 68
défi, niveau *9*
défis 9, 14, 15, 19, 20, 23–26, 28, 30, 31, 35–43, 45–52, 54–66, 69, 70, 73–76, 78, 79, 84, 86–90, 93, 94, 96–99, 101–103, 105, 106, 108–110, 112, 114–116, 119, 120, 122–126, 128, 129, 133–138, 142, 144–149, 159–162, 167–171, 176, 177, 179, 182, 184–187, 190, 191, 193, 194, 207–210, 216, 218–223, 226, 232, 233, 243, 244, 246–248, 251–254, 256, 258, 260, 263, 281, 282
dégénérescence des dents 147
déluge de comètes 155
démarcation *233*
démon de Maxwell 170
démonstration *201*
dénombrabilité 184
déplacement de couleur, Wien *120*
désastres futurs 154
détails *206*
détails de la nature *162*
détecteur d'ondes radio 72
détecteurs des airbags 30
détection de la polarisation à l'œil nu 77

E

ε_0 24
eau 139, 143
écart-type *253*
échasses 208
éclair 18, 23, 127, 248
éclair émet des rayons X 129
éclair, forme en zigzag 127
éclairement lumineux *248*
éclairement énergétique *248*
éclat métallique 142
écriture *214*
effacement *171*
effacement mémoire 169
effaçable *171*
effet 235
effet acousto-optique 144
effet acoustomagnétique 140
effet acoustoélectrique 138
effet Auger 144
effet Barnett *34*
effet Casimir 145
effet Compton 143
effet Cotton–Mouton 140
effet d'entraînement par photon 142
effet de la Belle au bois dormant 86
effet de peau 139
effet de pincement 139
effet de voile solaire 144
effet des cristaux liquides 141
effet Doppler, inversé 106
effet Einstein–de Haas *34*
effet Ettinghausen 140
effet Ettinghausen–Nernst 140
effet Faraday 140
effet Freederichsz 141
effet Hall 139
effet Hall photonique 140
effet Hanle 140
effet Josephson 139, 242
effet Kerr 141
effet Kerr optique 144
effet Kirlian 16
effet magnéto–Seebeck 140
effet magnétoacoustique 140
effet magnétocalorique 140
effet magnétorhéologique 141
effet magnétoélastique 139
effet Majorana 140
effet Meissner 141
effet Mößbauer 144
effet Nernst 140
effet optoacoustique 144
effet optogalvanique 144
effet Paschen–Back 139
effet Peltier 138
effet Penning 139
effet photo 142
effet photoacoustique 144
effet photoélectrique interne 142
effet photoélectromagnétique

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

E

EFFET

140
effet Pockels 141
effet radiomètre 144
effet Raman 144
effet Richardson 139
effet Righi–Leduc 140
effet Sasaki–Shibuya 139
effet Schadt–Helfrichs 141
effet Schottky 141
effet Seebeck 138
effet Shubnikov–de Haas 140
effet Smekal–Raman 144
effet Stark 142
effet Thomson 138
effet vanne de spin 140
effet Voigt 140
effet Weigert 142
effet Zeeman 139
effet Zener 142
effet Čerenkov 143
effet électrocinétique 141
effets optiques non linéaires 144
effets thermomagnétiques 140
effets thermoélectriques 138
EHF, extrêmement haute fréquence 81
Einstein, Albert 213
électrets *16*
électricité *26*
électricité statique 138
électrification 138
électrique, flux 26
électriques, poissons 30
électro-osmose 141
électrochromicité 143
électrode 47
électroluminescence 143
électrolyte 47
électrolytes 123
électromagnétique, onde 84
électromagnétisme comme preuve de la relativité restreinte 84
électromètres *21*
électromouillage 141
électronique des polymères 164
électrons 124
électronvolt *246*
électrostriction 141
élément d'un ensemble 23, 25, 35, *181*
éléphants 171
ELF 80
elfes *128*, 129
Eliza 173
émergence *218*, 218, 278
émergence des propriétés 218
émetteur radio, le plus simple possible 72
émetteur, le plus simple possible 72
émission de champ 141
émission thermique 139
émissivité 142, *146*
empirique *202*
empiriques, déclarations 202
Encyclopédie *33*
Énéide 231
énergie 18
énergie, conservation 112
énigme de la jeune mère *193*
ennuyeux, physique 178
enregistrement *168*
ensemble 179, *181*
ensemble d'arrivée *185*
ensemble des parties 181, *184*
ensemble-produit *182*
ensembles, utiles pour décrire l'Univers ? 224
entiers *189*
entiers naturels *187*
entités *162*
entraînement du potentiel vecteur par des courants 59
entre guillemets 162
entropie 167
environnement 120, *153*, *161*
épistémologie *277*
équation d'onde *70*
équation des lentilles minces *88*
équations d'évolution *152*
équilibre thermique 120
ères glaciaires 233
erreur *201*
erreurs aléatoires *253*
erreurs systématiques *253*
espace des phases *152*
espace vectoriel euclidien 25, 35
essence, versement 283
ET logique, porte 170
Êta Carinae 156
étalon, pomme 252
état 152
éther *108*, 205, 268
étincelle 18
étincelles 24
étiquettes anti-vol 140
étoile verte 120
étoile à neutrons 17
étoile, rapprochement 155
étoiles 187
EUV 83
évanescente, onde 291
évaporation de champ 142
événement *196*
évolution 171
ex nihilo *227*
exa 243
exactitude *253*
exigences symboliques, science des 192
existence de l'Univers 226
existence des concepts mathématiques 219
existence physique *219*
existence psychologique *220*
explanation 234
explication physique *232*
explosion de volcan 154
explosion du volcan de Yellowstone 155
expérience *163*, 164
expériences *196*
expérimentateurs *200*

F

fabrication 168
facteur de phase *61*
faisceaux lumineux, tournants 91
fait *196*, *201*
fantômes 291
farad 243

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

F

FARFADETS

farfadets 128
faux *201*
Fe 139, 144
feldspath 143
femto 243
fer 16, 139
fermer légèrement les paupières 90
ferromagnétisme *34*, 139
ferroélectricité 141
feu 138
fin de la physique appliquée 154
fin de la physique fondamentale 154
fin de la science 223
fini *183*, *224*
flamme 138
flash vert *99*, 266
flocons de neige 187
fluorescence 143
flux 284
flux d'énergie 248
flux magnétique *55*
fonction *185*
fonction mathématique *185*
fonctions harmoniques *135*
force de Coulomb 25
forme mathématique *62*
formule de Heaviside *56*
formule de Larmor *86*
four *120*
four micro-ondes 131
France, la vie est illégale 120
Friendbot 173
fréquence angulaire *70*
fusion froide 205
futur et présent 232

G

GaAs 143, 144
gadolinium 140
gaucher, matériau *106*
gauchers 64
gaz 144
Gd 139
GdSiGe 140
General Motors 18
giga 243
gloire 265
Goethe, Johann Wolfgang von 199, 220
grammatical *176*
grand frère 184
Grande Muraille 90
Grande Muraille de Chine 265
graphite 138, 139, 142
gravitoluminescence 144
gravité, cages de Faraday 146
gray 243, *247*
grille de Hermann *110*
grilles de Hering 110
guillemets 162
guérisseurs, Philippines 209
géant, volcan 155
génie *200*
générateur de Kelvin *18*, 283
génération de seconde harmonique 143
génération harmonique 144
géodynamo *132*

H

halo 89, *110*, 265, 266
halos 128
He–Ne 144
hecto 243
Heiligenschein *110*
henry 243
hertz 243
heure *243*
heurter un champ *56*
hexagone magique 195
HF, haute fréquence 81
Hg 140
Hilversum 130
Hollywood, films 197
hologramme *116*
hologrammes, en mouvement 116
holographie *117*
horreur du vide *222*
houblon 64
huile 141
humain, œil 78
hydrogène 142
hydrogène atomique *250*
hypothèse du continu *184*
hypothèses *201*
hélicoptère 129
hélium 137, 142, 234

I

icône *174*
id. *94*
idées vertes 207
îles Canaries 154
illumination 238
image *174*
image réelle *88*
image virtuelle *88*
images 93
images, et dispositifs de focalisation 87
imagination 162
imitation *202*
impédance caractéristique du vide 255
impédance/résistance d'onde 108
impénétrabilité 145
InAs :Mn 139
incandescence 138, *145*, 145
incertitude totale *253*
incubation 238
index, doigt 73
indicateur *174*
indice de réfraction, négatif 105
indigo 82
indiscernable 108
induction magnétique 35
indénombrabilité 184
indépendamment *178*
infini 25, 35, *183*, *223*
infinis 216
infinitude 25, 35
infinitésimaux *189*
informaticiens 160
information, tableau 188
infrarouge 81
injective *183*
InP 144
InSb 139, 140
insectes *76*
instabilité du manteau terrestre 154

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

instabilité du Système solaire 155
instant magique 161
instants magiques 238
instruments *211*
intelligent, dessein 229
intensité dipolaire 48
intensité lumineuse *248*
intention *231*
interaction *162*, *218*
interactions, réciprocité des *218*
interférence *73*, *74*
interféromètres 251
interféromètres en anneau 251
interrupteur électrique 43
interrupteur, inverseur 286
intersubjectivité *202*
invariance 23
invariance conforme 108
invariance de jauge *59*
invariance par parité *65*
invariant *225*
inventaire mondial des couleurs *266*
inversion du champ magnétique de la Terre 155
invisibilité, manteau 107
ion 47
ionisation 138, 141
ionisation de champ 142
ionosphère 48, 147, *148*
ions *29*, *123*, *125*
IRA ou infrarouge proche 81
IRB ou infrarouge moyen 81
IRC ou infrarouge lointain 81
ISO 213
isolants *20*
isolation 138
italique *174*

J

jauge de Lorentz *39*
jaune 82
jets *128*
jouer *196*
joule 243
jour sidéral 256
jour, unité de temps *243*
journée ensoleillée 248
justesse *201*

K

katal 213, 243
kelvin *241*
ketchup, mouvement 124
kilo 243
kilogramme *241*
Klitzing, von – constante 256
KPO_4 143

L

lagrangien de Proca *67*
lagrangien du champ électromagnétique 38
LaH 144
lait 100, 203, 277
Landolt–Börnstein 211
langage 160
langage humain *174*, *175*, *177*
langage parlé *174*
langage écrit 174
langues parlées par une personne 188
largeur totale de la courbe à la moitié du maximum 253
laser 116
laser et billes de verre 93
laser et Lune 90
laser pulsé à impulsion mortelle *121*
laser, lévitation 93
lasers à rayons X 134
lassitude comme signe de vérité 205
latéralisation *65*, 65
lentille *87*
Levitron 272
LF, basse fréquence 80
ligne à haute tension 43
lignes du champ 57
lignes tourbillonnaires 57
lignes électriques 43
lignes équipotentielles 57
limite de la diffraction *89*
limite de Planck 83
limite des basses fréquences 80
limite sur la résolution *90*
$LiNbO_3$ 143, 144
linguistes 160
linéarité du champ électromagnétique 70
liquides 144
lithium 234
litre *243*
lobbyistes 199
localisation (faible, d'Anderson) 138
localité *224*
logiciens 160
loi 215
« loi » de Gauss *26*
loi de la nature, première 161
loi de Laplace–Gauss *253*
loi normale *169*
« lois » de Coulomb et de Gauss, équivalence des 26
lois de la nature *162*, 228
lois et saucisses 197
lois, fainéantise 197
longueur d'onde *74*
longueur d'onde de Compton 256
longueur d'onde de de Broglie 242
longueur gravitationnelle de la Terre 258
loupe *88*
lueur dans les yeux d'un chat 110
lumen 243
luminescence 143
luminosité 248
luminosité du Soleil 258
lumière 82
lumière barométrique 138
lumière est électromagnétique (la) 78
lumière infrarouge *75*
lumière ultraviolette *75*
lumière, détection des oscillations *75*
lumière, moment cinétique 96
lumière, pression 93
lumière, vitesse constante en électromagnétisme 84

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Lune et cerveau 234
Lune et laser 90
lunettes 123
lunettes de vision nocturne 249
Lunokhod 89
lux 243, 248
lévitation 93, *134*, 141
lévitation humaine 137

L
Lune

M

μ_0 36
machines électrostatiques 45
macula lutea *78*
magie 228
magique, cubes et carrés 194
magique, hexagone 195
magiques, cubes 296
Magnetobacterium bavaricum 31
magnétar 17, *50*
magnétique, potentiel vecteur 57
magnétique, pôle, dans un miroir 64
magnétisme commutable 139
magnétoencéphalographie 68
magnéton nucléaire 256
magnétorésistance 139
magnétosomes 31
magnétostriction 139
mammifères 115
manchot *64*
Manhattan comme mine de cuivre 20
manteau d'invisibilité 107
manteau terrestre *133*
marche 166, 275
marche sur deux pieds 166
marguerite 187
mariage 159
Mars 247
maser 96
masse 152
masse de Jupiter 259
masse de la Lune 258
masse de la Voie lactée 259
masse du Soleil 258
masse négative 135
mathématiciens 160, *178*, *191*
mathématiques 178, *192*
mathématiques, physique appliquée *179*
matière, transformation 227
matériau gaucher *106*
matériaux photoréfractifs 144
matériaux photoréfringents 91
Maxwell, démon 170
mensonges *201*, *204*, 208
mensonges généraux *205*
mensonges spécifiques *205*
menteur, paradoxe 207
mercure 138, 142
mesurabilité 23, 25, 35
mesure *169*, *212*
MF, moyenne fréquence 80
Mg 139
micro 243
micro-ondes 81
micronystagmus *114*
microscope *88*
microscope optique 289
microscopie *116*
microscopie confocale à balayage laser *117*
microscopie en champ clair *116*
microscopie en champ proche à balayage optique *117*
microscopie en champ sombre *117*
microscopie oblique *117*
microscopie à contraste d'interférence différentielle *117*
microscopie à contraste de phase *117*
microscopie à déplétion par émission stimulée *117*
microscopie à fluorescence *117*, 118
miel 59
mile 244
milli 243
million de dollars 217
mind-reading 134
minute *243*, *259*
miracles 157, 203, 235
mirage *90*
miroir 45, 64, 86
miroir commutable 144
miroir concave 65
Mn 139
Mo 139
modèles *197*
modèles de l'éther *268*
modèles de la nature *162*
mole *241*
moment cinétique 35, 96
moment cinétique de la lumière 96
monde *161*
monde, chaos ou système 161
monochromatique *97*
monopôle magnétique *66*
monopôles 55
monopôles magnétiques 68
montgolfière 130
morphogénétiques, champs 209
moteur exploratoire *237*
moteur unipolaire 48
motif *231*
mots *174*
mots entendus 188
mots imprimés 188
mots prononcés 188
moulin à lumière *94*
mouvement *153*
mouvement des images 153
mouvement et unités de mesure 242
mouvement, réversibilité 63
moyenne 214
mu-métal *147*
multicouches métalliques 139, 140
multivers 210
muscles 188
mystères 203
mètre *241*
méga 243
mélange de fréquence 144
mélange de lumière *97*
mémoire *163*
mémoire, effacement 169
mémoire, non réinscriptible

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

171
métamatériaux *106*
métaphore *230*
métaux 145
méthode scientifique 199
métricité 23, 25, 35

N
n-Ge 139
n-Si 139
NaCl 139
naine blanche 17
nano 243
nanocristaux 50
NASA 247
NASA 97
nature *161*
nature, sens de la 230
Nb-Oxyde-Nb 139
Ne 139
nerfs *124*
neurologues 160
neurones 166, *170*, 188
newton 243
Ni 139
nickel 16
niobium 138
Nit 249
niveau des océans 154, 155
NOAA 301
noirceur 142
nombre d'Avogadro 255
nombre de dimensions 25, 35
nombre de particules *224*, 224
nombre fini *216*
nombre infini de préfixes du SI 252
nombres *191*
nombres complexes 191
nombres dyadiques *189*
nombres ordinaux *189*
nombres premiers de Sophie Germain *296*
nombres rationnels *189*
nombres rationnels dyadiques *189*
nombres réels *189*, *190*
nombres surréels 277
nombres transfinis *184*
nombreux types *183*
non cantoriens *276*
non stationnaires *135*
non-sens *207*
normale, loi 253
normalité *282*
normalité de π 260
notion *174*
nova 156
noyau terrestre *133*
nuage d'Oort 155
nuage de gaz interstellaire 154, 155
nuage moléculaire 155
nuages d'orage sont des batteries 129
nuages de plasma, flottants 131
nœud *64*
néant *221*
négative *19*

O
objectif *231*
objet façonné 229
objet, lévitation 135
observables *213*
observateur à la vitesse de la lumière est impossible 86
observation *169*, 214
observations *162*
octet *171*
œil 114
œil humain 264
œil, sensibilité 113
œil humain 76
ohm 243
oiseaux 43, 76
ombre avec un halo ou une auréole 110
ombre avec un trou 91
ombre de la Grande Muraille de Chine 90, 265
ombres des câbles 48
ombres, couleur des 266
onde *70*
onde électromagnétique 84
onde électromagnétique, création 84
onde, moment cinétique 96
ondes de polarisation circulaire *78*
ondes gravitationnelles 96
ondes radio *72*, 80
ondes térahertz 81, 147
ondes électromagnétiques *70*
ondes électromagnétiques sphériques 69
Opel 18
opposé 177
optique adaptative 114
optiques, microscopes 289
opération binaire *186*
or 141
orangé 82
ordre 23
organes sensoriels des plantes pour les champs électriques et magnétiques 69
ornithorynque 30
orque *219*, 230
os humain 147
OVNI 205

P
π, normalité de *259*
p-Ge 142
paradoxe de la description incomplète *218*
paradoxe de la description surcomplète *218*
paradoxe du menteur 207
paramagnétisme *34*, 139
paramètre *213*
paratonnerre 20
paraélectricité 141
paresse 197
paresse en physique 196
parhélie *101*
parhélies 265
parsec 256
particules de spin 1 96
particules de spin 2 96
particules quantiques 50
particules, nombre *224*
parties, somme des 218
pascal 243
Pb 144

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

P

PbLaZrTi

PbLaZrTi 142
PbSe 138
PbTe 138
peau 81, 97
peinture rétro-réfléchissante 110
perceptions *162*
permittivité 108
permittivité diélectrique du vide 254
permittivité du vide *24*
perméabilité 108
perméabilité du vide *36*
perméabilité magnétique du vide 254
personne 273
perverti *234*
phase *70*
philosophes des sciences 160
phosphorescence 143
phot 249
photoconductivité 144
photographie *116*, 142
photoluminescence 143
photon, masse du 67
photostriction 142
photoélectricité 142
physiciens expérimentateurs *200*
physiciens théoriciens *200*
physiologie 160
physique *196*, *199*
physique de l'état solide, dans la société 145
physique ennuyeuse 178
physique, étymologie 200
phénomène *196*
phénomènes artificiels 217
phénomènes surnaturels 217
pico 243
pierres 14, 185, 227, 232, 238
pile *44*
pincettes optiques *95*
pistolet à impulsion électrique 41
pièges de Paul 137
pièges de Penning 137
piézomagnétisme 139
piézoélectricité 141
Planck, unités corrigées 246
planète, réchauffement 208
plaques *133*
plasma, nuages flottants 131
plasmas 123, 139, 144
plasmoïdes *131*
platonisme *178*
point de Poisson 91
point singulier *298*
poisson abyssal 143
polarisabilité 141
polarisabilité électrique *51*
polarisation *76*, 142
polarisation circulaire, onde *78*
polarisation de la lumière 76
polarisation électrique *21*
polariseurs dans les éclairages et pare-brise des voitures 109
polders 90
polymère 142, 143
polymères, électronique 164
pomme comme pile 44
pomme de terre comme pile 44
pomme étalon 252
pommes 203
pommiers 252
porte, ET logique 170
portée ontologique *221*
positive *19*
positive ou négative 23
potassium 29
potentiel vecteur magnétique *57*
potentiel vecteur, entraînement par des charges 59
potentiel électrique *59*
poussière 144
pouvoir rotatoire *289*
pression de la lumière 93
pression lumineuse 144
primates 115
primitives sémantiques universelles *176*
principe anthropique *233*
principe d'exclusion de Pauli 276
principe physique *196*
principe porcin *234*
principe simien *234*
produit cartésien *182*
promenade de Planck 250
propositions 160
propositions indécidables *206*
propositions, ennuyeux 205
propriétés de la nature *162*
propriétés émergentes 218
protan 122
protonvolt 247
précision *206*, *253*, *254*
préfixes *243*, 280
préfixes du SI 252
préfixes, SI 243
préjugé *203*
présocratiques 279
pseudovecteur *35*
psychologie collective 202
psychologie de l'enfance 160
psychologique, existence 220
publique *205*
puissance 248
pyroélectricité 141
périgée 258
périhélie *259*
péta 243
pétroliers 46
pétroliers, naufrage 46
pôle magnétique dans un miroir 64
pôle nord 33
pôle sud 33
pôles *30*
pôles nord 154
pôles sud 154

Q

quantités *213*
quantum d'action *119*
quantum de conductance 256
quantum du flux magnétique 256
quartz 141–143
quaternions 191
queues des comètes 96

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

R

RADIAN

R
radian *242*
radioactivité 247
radiocommande, la plus simple possible 72
radiomètre de Crookes *94*
rapport de fréquence de Josephson 256
rapport de masse proton–électron 256
rasoir d'Occam 199
rayon classique de l'électron 256
rayon de Bohr 256
rayon de la Lune 258
rayon de la Terre 258
rayon de Schwarzschild comme unité de longueur *246*
rayon laser 97
rayon laser tubulaire 122
rayon vert 266
rayon à traction 109
rayonnement *72*, *152*
rayonnement blanc 143
rayonnement continu de freinage 143
rayonnement cosmique 125
rayonnement de chaleur 138
rayonnement de corps noir 145, *146*
rayonnement de transition 143
rayonnement thermique 120, 138, *145*, 145
rayonnement, dépendance selon l'observateur 131
rayons γ 83
rayons cathodiques *27*
rayons cosmiques 125, 127, 129, 155
rayons terrestres 210
rayons X 83
rayons X, durs 83
rayons X, mous 83
recherche de nouveauté 238
recombinaison 139
recouvrement des impôts 241
recul *27*
relation 179
relation binaire *182*
relation d'Ohm *126*
relation de dispersion *70*
relation de Lorentz *38*
relations *162*, *182*
relations de transformation *152*
religion *204*
requins 30
respect 230
respirations 188
rose 228
rotation de Faraday 140
rotation de la Terre 250
rotation de la Terre, fin 155
rotationnel *58*
rotationnel, visualisation du 58
roue de Barlow 48
rouge 82, *114*
rouge primaire 82
ruban adhésif 45
Rubik's Cube 188
rubis 142, 144
rumeurs 209
rutile *77*
règle de Lenz *55*
règles *197*
règles de la nature *162*
réalité 162
réchauffement de la planète 208
réductionnisme 233
réels *189*
réflectance *93*
réflectivité 142
réflexion de Bragg 144
réfraction *87*, 105, 110, 140, 142
réfraction, indice négatif 105
réseau *166*
réseaux de neurones 166
résine 15
résineux 19
résistance d'atomes uniques 51
résistance électrique *51*
résistivité, effet Joule 138
résolution *289*
résonance cyclotron 140
résonance magnétique 141
résonances de Schumann 270
rétine 114
rêves 162

S
sable 187
sacs comme dispositifs d'anti-gravité 137
Sahara 187
Sahara, signal de 50 Hz au milieu du 147
salamandre 30
sans dimension 255
saturation 238
Scarabeus 76
science *210*
science des exigences symboliques 192
science des nécessités symboliques 180
science, fin de la 223
sciences formelles *196*
sciences humaines *196*
sciences naturelles *196*
scientifique *210*
scientisme *210*
Se 144
seconde *241*, *243*, *259*
sel 141
semi-anneau 187
semi-conducteurs 140
semi-conductivité 138
sens de la nature 230
sens de la vie 230
sensations *162*
sensations et mensonges 205
sensibilité scotopique *286*
sept sages 15
Service international de la rotation terrestre *250*
seuls les morts sont légaux 120
SHF, super haute fréquence 81
Si 142
si 177
SI, unités *241*
SI, unités supplémentaires *242*
siemens 243
sievert 243, *247*

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

S

SIGNAL

signal *107*
signal physique *102*
signaux nerveux 275
signe *174*
silicium 138, 139
singularités nues 156
sirop 289
sodium 29
Soleil 273, 293
soleil double 101
Soleil, luminosité 273, 293
Soleil, émission de chaleur 293
Soleil, émission thermique 273
solidification du noyau de la Terre 156
solidité *138*, 145
somme des parties 218
son 89
sonoluminescence 144
souvenirs 214
soviets 32
spatiale, dimensionnalité 108
spectromètres 97
spin 34
spiritualité *204*
sprites 128
spéculations *201*
spéculative *202*
squark 300
$SrAlO_4$ 143
stationnaire *135*
stigmates 209
Stoney, unités 246
stratus *127*
structure algébrique *186*
structures d'ordre *186*
structures topologiques *186*
stéradian *242*
succession 23
sucre 87, 142, 143, 289
suite de Fibonacci 276
sujets *176*
supernovæ 156
superposition *70*
superradiation 144
superstition *203*
supraconducteurs 141
supraconductivité 138
supraluminique 107
surdescription *60*
surjective *183*
surnaturels, phénomènes 217
surnuméraires, arcs-en-ciel 74
surprises dans la nature 154
surprises divines 235
surréel *189*
sursauteur gamma mou 17
sursauts gamma 155
sylphes *128*, 129
symbole mathématique *213*
symboles *174*
symboliques, science des exigences 192
symétrie de jauge *59*
symétries *215*
synapses *170*
syntaxique *176*
système algébrique *186*
système d'unités de Gauss 24
système d'unités de Heaviside–Lorentz 24, 246
système d'unités gaussiennes 246
système d'unités électromagnétiques 24, 246
système d'unités électrostatiques 24, 246
Système géodésique mondial 259
Système international 24
Système International d'Unités (SI) *241*
systèmes d'unités *24*
séparabilité 23
séparabilité de l'Univers 225
sérieux *234*

T

table comme dispositif d'anti-gravité 137
taille de la Voie lactée 259
taille des chaussures 252
$TbCl_3$ 143
temps universel coordonné *250*
température du fond diffus micro-onde 257
tempêtes solaires 147
tenseur 37
tenseur antisymétrique *35*
tenseur dual du champ *55*
tenseur énergie–impulsion 63
tenseur énergie–impulsion du champ électromagnétique *63*
termes *174*
Terre, rotation 250
tesla 36, 243
test 235
thallium 94
« théorème » d'Ampère *36*
thermique, rayonnement 145
thermoluminescence 143
thèses *201*
théoriciens *200*
théorie *204*
théorie de l'évolution *205*
théorie des champs *57*
théorie du mouvement *159*
théorie du Tout 159
théorie physique *204*
théorème d'Earnshaw *135*
théorème de Gauss *284*
TNT, contenu énergétique 256
TOE 159
TOM 159
tomographie *117*
tonne *243*
topologie 108
tourmaline 141
tournesol 187
tout, le *161*
trace 38
traction, rayon 109
transfinis, nombres 184
transformateur, champ de Poynting 69
transformation de jauge *60*
transformation de la matière 227
transformations de jauge *152*
transparence 142
transporteur d'énergie *107*
transsubstantiation 205
triboluminescence 143
triréfringence *76*, *76*
tritan 122

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

T

TSUNAMI

tsunami géant issu des Îles Canaries 154
tubulaire, rayon laser 122
tungstène 109
télescope *88*
télescope de Galilée 88
télescope hollandais *88*
télescopes dans la nature 88
télescopie *117*
télé 143
télécommande à distance, la plus simple possible 72
télécommunications 120
téléphone portable 16
téléphone satellite et vitesse de la lumière 73
télévision 15
téra 243
térahertz, ondes 81, 147

U

udeko 243
udekta 243
UHF, ultra haute fréquence 81
UICPA 281
UICPA 213
UIPPA 281
UIPPA 213
ultrasons 135
ultraviolet 82
unification *232*
Union Géodésique et Géophysique Internationale 259
unité *212*, *241*
unité astronomique 256
unités de base *241*
unités de Planck corrigées *246*
unités de Stoney 246
unités naturelles de Planck *244*
unités SI 253
unités, non SI 244
unités, véritables naturelles *246*
Univers *161*
univers, autres 202
univers, compréhensible 225
univers, effondrement 156
univers, est-ce un ensemble ? 224
univers, existence 226
univers, un seul 217
universaux *175*
universaux lexicaux 176
UNIX 28
UVA 83
UVB 83
UVC 83

V

valeur *185*
vampire 86
vanadate 77
variable *213*
variance *253*
vecteur d'onde *70*
vecteur de Poynting *61*
vendeko 243
vendekta 243
ver luisant 143
verbe *176*
verre 138, 140, 142
vert 82
vert primaire 82
vert, étoile 120
verte *114*
vertes, idées 207
vertébrés gazeux irritables 204
VHF, très haute fréquence 81
vide 108
vide, instable 156
vie, sens de la 230
violet 82
virtuel, image 88
vitesse d'un électron 103
vitesse de dérive 124
vitesse de front *104*
vitesse de groupe *102*
vitesse de groupe négative 104
vitesse de groupe peut être infinie 103
vitesse de l'énergie *104*
vitesse de la lumière 124
vitesse de la pointe d'un coup de foudre 48
vitesse de phase *102*
vitesse des électrons 124
vitesse du signal électrique 124
vitesse précurseur *104*
vitesse, dérive des électrons 49
vitreux 19
vocabulaire *174*, *192*
voir 120
voitures, polariseurs intégrés 109
volt 243
vrai *204*
vérification 238
véritable vitesse de la lumière *105*
vérité *201*
vérité pure 201

W

W 139, 142
watt 243
weber 243
weko 243
wekta 243
Wien, « loi » du déplacement de couleur *120*
wolframates 143

X

xenno 243
xenta 243

Y

yeux des oiseaux 115
yocto 243
yotta 243

Z

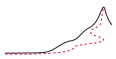
zepto 243
zetta 243
ZFC *182*
ZFC, axiomes 181
ZnS 143
ZnSb 138
zéro 187

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010

Z

ZERO

La Montagne Mouvement – L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoît Clénet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'Aventure de la Physique – Vol. III

Lumière, Charges et Cerveau

Pourquoi le changement et le mouvement existent-ils ?
Comment l'arc-en-ciel se forme-t-il ?
De tous les voyages possibles, lequel est le plus fantastique ?
L'« espace vide » est-il réellement vide ?
Comment pouvons-nous faire léviter des objets ?
À partir de quelle distance entre deux points
devient-il impossible d'en intercaler un troisième ?
Que signifie « quantique » ?
Quels problèmes demeurent sans réponse en physique ?

En répondant à ces questions ainsi qu'à d'autres sur le mouvement, cette collection constitue une introduction à la physique moderne qui se veut divertissante tout en mettant l'esprit à l'épreuve, chaque page proposant une surprise ou un défi à l'imagination.

En partant de la vie quotidienne, cette aventure donne un aperçu des derniers résultats en mécanique, thermodynamique, électrodynamique, relativité, mécanique quantique, gravité quantique et leur unification. Ce texte s'adresse aux étudiants du premier cycle universitaire et à tous ceux qui s'intéressent à la physique.

Christoph Schiller, titulaire d'un doctorat de l'Université Libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique.

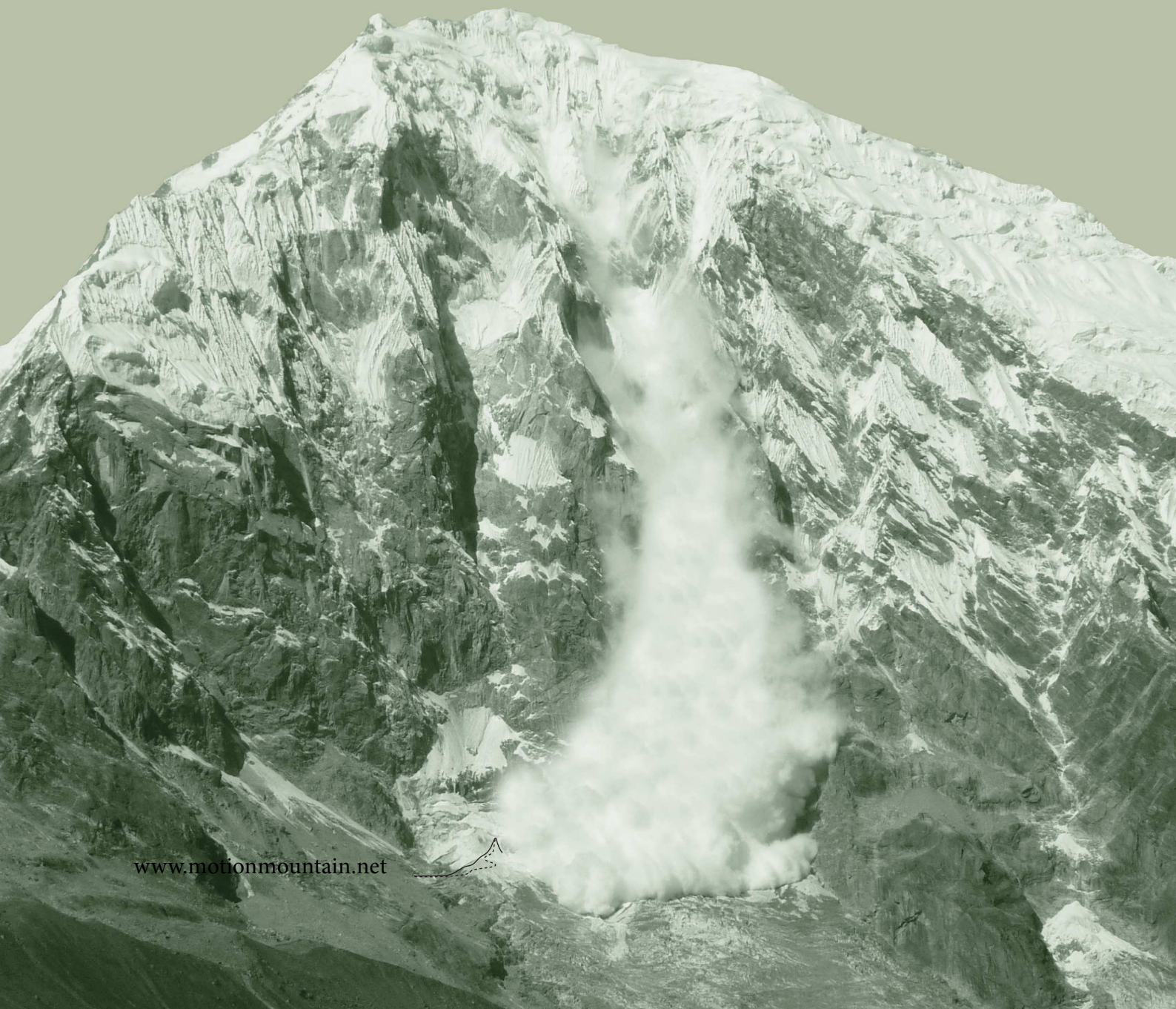
disponible gratuitement sur www.motionmountain.net

Christoph Schiller Traduit par Didier Rajon

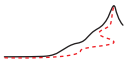
LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL.IV

LE QUANTUM DE CHANGEMENT

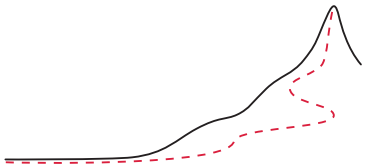


www.motionmountain.net



Christoph Schiller

MONTAGNE MOUVEMENT



L'aventure de la physique
Volume IV

Le quantum de changement

Traduit de l'anglais par Didier Rajon

31ème édition, disponible gratuitement sous forme pdf
avec les films sur www.motionmountain.net

Editio trigesima prima.

Proprietas scriptoris © Chrestophori Schiller
tertio anno Olympiadis trigesimae secundae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliqua, quae
partem horum verborum continet; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Trente-et-unième édition.

Copyright © 1990–2022 par Christoph Schiller,
de la troisième année de la 24ème olympiade
à la troisième année de la 32ème olympiade.

Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0
Allemagne, dont le texte peut être consulté en intégralité sur
la page internet creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction, distribution
et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel* produit ou
service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée sans le
consentement écrit du détenteur du droit d'auteur. Toute personne est
libre de consulter, enregistrer et imprimer ce fichier pdf pour son
usage personnel, et de le diffuser par des moyens électroniques, mais
uniquement sous sa forme originale et de manière entièrement gratuite.

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.

Préface

> « Primum movere, deinde docere. * »
>
> Antiquité

Cette série de livres s'adresse à toute personne curieuse en ce qui concerne le mouvement dans la nature. Comment les choses, les gens, les animaux, les images et l'espace vide se déplacent-ils? La réponse nous entraine dans de nombreuses aventures, et ce volume présente celles qui sont les conséquences de la découverte qu'il existe une valeur minimale pour les changements dans la nature. Cette valeur de changement minimal, le quantum d'action, conduit à ce que l'on appelle la *physique quantique*. Dans la structure de la physique moderne, que montre la Figure 1, la physique quantique traite quatre des huit sommets. Le présent volume introduit les fondements de la théorie quantique, déduit la structure des atomes, et explique l'introduction des probabilités, des fonctions d'onde et des couleurs.

Cette introduction à la physique quantique est le résultat d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990: présenter les fondements du mouvement quantique d'une façon simple, à jour et captivante.

Afin d'être *simple*, le texte se concentre sur les concepts, tout en maintenant les mathématiques à leur minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules de calculs. L'intégralité du texte est à la portée d'un étudiant de premier cycle universitaire.

Afin d'être *à jour*, ce texte est enrichi par de nombreux joyaux, aussi bien théoriques qu'empiriques, qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *captivant*, le texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale se doit d'être comme d'assister à un spectacle de magie. On le regarde, on s'en étonne, on n'en croit pas ses yeux, on y réfléchit, et finalement on comprend le truc. Lorsque l'on regarde la nature, on fait souvent la même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui incitera le lecteur à réfléchir. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise du texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre en pédagogie, se traduit ainsi: «fortifier les gens, clarifier les choses». Clarifier les choses (et n'adhérer qu'à la vérité) demande du courage, car changer les habitudes de pensée provoque la peur, souvent masquée derrière la colère. Mais en surmontant nos peurs, nous gagnons en force. Et nous éprouvons des émotions intenses et belles. Toutes les

* «D'abord émouvoir, ensuite enseigner.» Dans les langues modernes, le type de *mouvement* mentionné ici (celui du cœur) est appelé *motivation*. Les deux termes sont issus de la même racine latine.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

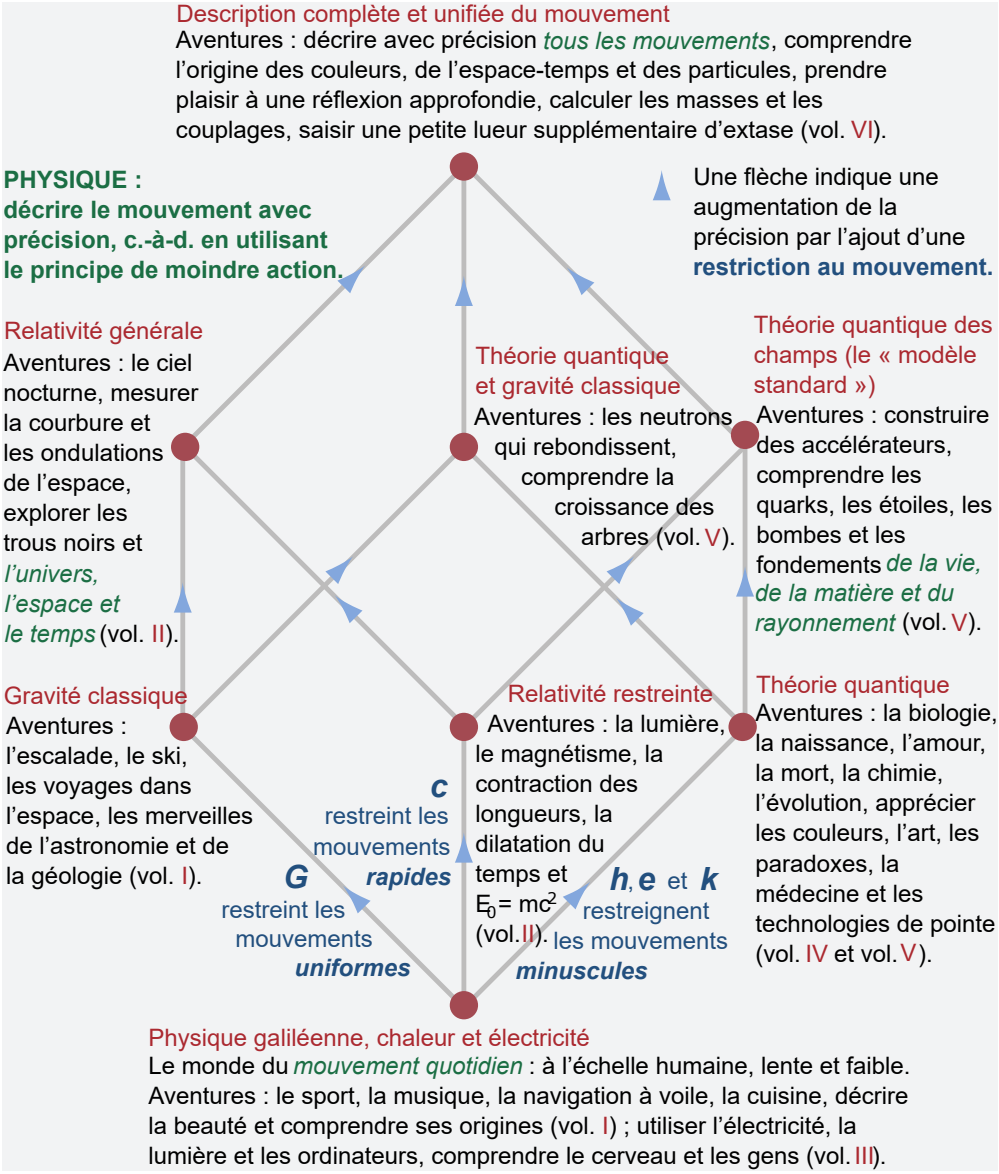


FIGURE 1 Une carte complète de la physique, la science du mouvement, telle qu'elle fut proposée pour la première fois par Matvei Bronshtein (Vinnytsia, 1907 – Leningrad, 1938). Le cube de Bronshtein commence par le bas avec les mouvements de la vie quotidienne et indique les liens vers les domaines de la physique moderne. Chaque lien augmente la précision de la description et est due à la prise en compte d'une restriction du mouvement. Les restrictions sont données par la constante de gravitation G pour les mouvements uniformes, par la vitesse de la lumière c pour les mouvements rapides, et par la constante de Planck h, la charge élémentaire e et la constante de Boltzmann k pour les mouvements minuscules.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

grandes aventures de la vie le permettent, et explorer le mouvement en est une. Bonne lecture!

Christoph Schiller

Comment utiliser ce livre

Les notes en marge renvoient à la bibliographie, à d'autres pages, ou aux solutions des défis. Dans l'édition en couleur, les notes en marge, les liens vers les notes de bas de page et vers des sites internet apparaissent en vert. Avec le temps, les liens vers les sites internet ont tendance à disparaître. La plupart des liens peuvent être recouvrés par l'intermédiaire du site www.archive.org qui garde une copie des anciennes pages internet. Dans l'édition pdf gratuite de ce livre, disponible sur www.motionmountain.net, tous les liens et pointeurs verts sont accessibles en cliquant dessus. L'édition pdf contient également tous les films; ils sont visualisables directement par Adobe Reader.

Des solutions et des suggestions pour les *défis* se trouvent en annexe. Les défis sont classés en facile (f), niveau étudiant (e), difficile (d) et niveau recherche (r). Les défis pour lesquels les solutions n'ont pas encore été introduite dans le livre sont marqués (pe).

Conseils pour l'étudiant

Étudier permet de découvrir quel genre de personne nous pouvons être. L'instruction élargit les connaissances, améliore l'intelligence et apporte un sentiment d'accomplissement. Par conséquent, apprendre à partir d'un livre, en particulier s'il traite de la nature, se doit d'être efficace et d'apporter du plaisir. Méfiez-vous des mauvaises méthodes d'enseignement comme de la peste! N'utilisez pas un marqueur, un stylo ou un crayon pour mettre en évidence ou souligner un texte sur papier. C'est une perte de temps, cela fournit une fausse sensation de confort et rend le texte illisible. Et n'essayez pas d'étudier à partir d'un écran. En particulier, n'essayez jamais, au grand jamais, d'apprendre sur internet, à partir de vidéos, de jeux ou d'un téléphone portable. La plupart des sites internet, presque toutes les vidéos et tous les jeux sont des poisons et des drogues pour le cerveau. Les téléphones portables sont des distributeurs de drogues qui rendent les gens dépendants et les empêchent d'apprendre. Personne n'apprend efficacement ni ne prend du plaisir à le faire en faisant des marques sur du papier ou en regardant un écran.

De ma propre expérience d'élève et d'enseignant, une méthode d'apprentissage n'a jamais manqué de transformer des élèves ayant des difficultés en des élèves couronnés de succès: lorsque vous lisez un texte pour l'étudier, faites un résumé de chacune des sections que vous lisez, *en vos propres termes et images, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, relisez à nouveau la section. Recommencez jusqu'à ce que vous soyez capable de résumer clairement ce que vous avez lu, en vos propres termes et images, à voix haute. Et *prenez du plaisir* à cette narration à voix haute! Vous pouvez le faire tout seul ou avec des amis, dans une pièce ou tout en marchant. Si vous suivez cette méthode pour tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'étude et de lecture de façon significative; vous prendrez beaucoup plus de plaisir à étudier à partir de bons textes et vous détesterez beaucoup moins les mauvais textes. Les personnes qui maitrisent cette méthode peuvent

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

même l'utiliser tout en suivant un cours, à voix basse, évitant ainsi d'avoir à prendre des notes.

Conseils pour l'enseignant

Un enseignant aime les élèves et aime à les guider dans l'exploration du domaine qu'il s'est choisi. Son enthousiasme est la clef pour éprouver de la satisfaction dans son travail. En tant qu'enseignant, avant de débuter un cours, représentez-vous, ressentez et dites-vous à vous-même combien vous appréciez le sujet de la leçon. Ensuite, représentez-vous, ressentez et dites-vous à vous-même comment vous aller conduire chacun de vos élèves à apprécier ce sujet autant que vous-même. Faites cet exercice sciemment, chaque jour. Vous minimiserez les difficultés dans votre classe et maximiserez votre réussite professionnelle.

Ce livre n'a pas été écrit avec les examens à l'esprit; il a été écrit pour que les enseignants et les étudiants *comprennent* et *prennent du plaisir* à la physique, la science du mouvement.

Vos commentaires

La dernière édition pdf de ce texte est, et restera, téléchargeable gratuitement depuis internet. Je serais ravi de recevoir un courriel de votre part à fb@motionmountain.net, tout particulièrement concernant les points suivants:

Défi 1 e
— Qu'est-ce qui n'était pas clair et qui devrait être amélioré?
— Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris?

De même, toute aide concernant les points spécifiques qui sont énumérés sur la page internet www.motionmountain.net/help.html sera la bienvenue. Tout commentaire sera utilisé pour améliorer la prochaine édition. Je vous invite à envoyer vos commentaires par courrier ou en envoyant un pdf avec vos annotations ajoutées en jaune, à me fournir des illustrations ou des photos, ou bien en contribuant à errata wiki depuis le site internet. Si vous voulez traduire un chapitre du livre dans votre propre langue, merci de me le faire savoir.

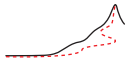
Au nom de tous les lecteurs, merci d'avance pour votre apport. Si votre contribution est particulièrement utile, votre nom sera mentionné (si vous le désirez) dans les remerciements ou vous recevrez une récompense, ou encore les deux.

Votre soutien

Vos dons à l'organisation caritative, à but non lucratif et exonérée d'impôt, qui produit, traduit et publie cette série de livres, sont les bienvenus. Pour plus de détails, visitez la page internet www.motionmountain.net/donation.html. L'autorité fiscale allemande vérifie l'utilisation appropriée de vos dons. Si vous le désirez, votre nom sera ajouté à la liste des sponsors. Merci d'avance pour votre aide au nom de tous nos lecteurs des quatre coins du monde.

La version papier de ce livre est disponible, en couleur ou en noir et blanc, sur www.amazon.com, en anglais et dans quelques autres langues. Mais tout d'abord, bonne lecture!

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Table des matières

7 Préface

Comment utiliser ce livre 9 • Conseils pour l'étudiant 9 • Conseils pour l'enseignant 10 • Vos commentaires 10 • Votre soutien 10

12 Table des matières

16 1 L'action minimale – la théorie quantique pour les poètes

Les effets du quantum d'action sur le repos 21 • Les conséquences du quantum d'action pour les objets 21 • Pourquoi «quantique»? 24 • L'effet du quantum d'action sur le mouvement 27 • Les surprises du quantum d'action 28 • La transformation, la vie et Démocrite 31 • Le hasard – une conséquence du quantum d'action 35 • Les ondes – une conséquence du quantum d'action 37 • Les particules – une conséquence du quantum d'action 38 • L'informatique quantique 39 • Curiosités et défis amusants concernant le quantum d'action 40 • Les dangers de l'achat d'une boite de haricots 41 • Un résumé: la physique quantique, la loi et l'endoctrinement 43

44 2 La lumière – les conséquences étranges du quantum d'action

Comment se comportent les lampes de faible luminosité? 44 • Les Photons 49 • Qu'est-ce que la lumière? 51 • La taille des photons 52 • Peut-on compter les photons? – La lumière compressée 52 • La position des photons 56 • Les photons sont-ils nécessaires? 60 • Les interférences: comment une onde peut-elle être constituée de particules? 63 • L'interférence d'un seul photon 66 • La réflexion et la diffraction déduites des photons à flèches 67 • La réfraction et la réflexion partielle déduites des photons à flèches 69 • Des photons aux ondes 70 • La lumière peut-elle se déplacer plus vite que la lumière? – Les photons réels et les photons virtuels 71 • L'indétermination des champs électriques 73 • Comment l'échange de photons virtuels peut-il conduire à une attraction? 73 • Deux photons peuvent-ils interférer? 74 • Curiosités et défis amusants concernant les photons 75 • Un résumé sur la lumière: particule et onde 79

81 3 Le mouvement de la matière – au-delà de la physique classique

Les verres de vin, les crayons et les atomes – pas de repos 81 • Pas de précision infinie pour les mesures 82 • Les gaz froids 83 • Les écoulements et la quantification de la matière 83 • Les écoulements de fluides et les quantons 84 • Frapper sur les tables et la quantification de la conductivité 84 • Les quantons de matière et leur mouvement – les ondes de matière 85 • La masse et l'accélération des quantons 89 • Pourquoi les atomes ne sont-ils pas plats? Pourquoi les formes existent-elles? 89 • La rotation, la quantification du moment cinétique et la pénurie de pôles Nord 91 • La rotation

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

des quantons 93 • L'argent, Stern et Gerlach – la polarisation des quantons 94 • Curiosités et défis amusants concernant la matière quantique 95 • Premier résumé sur le mouvement des particules quantiques 97

98 4 La description quantique de la matière et de son mouvement
Les états et les mesures – la fonction d'onde 98 • Visualiser la fonction d'onde: les flèches tournantes et les nuages de probabilité 100 • L'évolution de l'état – l'équation de Schrödinger 103 • L'auto-interférence des quantons 105 • La vitesse des quantons 105 • L'étalement des quantons 106 • L'effet tunnel et les limites de la mémoire – l'amortissement des quantons 107 • La phase quantique 109 • Deux faisceaux d'électrons peuvent-ils interférer? Y a-t-il des faisceaux d'électrons cohérents? 113 • Le principe de moindre action en physique quantique 114 • Le mouvement des quantons avec spin 116 • Les équations d'onde relativistes 118 • Les mouvements liés, ou les quantons composites contre les quantons élémentaires 120 • Curiosités et défis amusants concernant le mouvement quantique de la matière 122 • Un résumé sur le mouvement des quantons de matière 124

126 5 La permutation des particules – les particules sont-elles comme les gants?
Différencier les objets macroscopiques 126 • Distinguer les atomes 128 • Pourquoi l'indistinguabilité apparaît-elle dans la nature? 129 • Est-il possible de compter les particules quantiques? 130 • Qu'est-ce que la symétrie de permutation? 131 • L'indistinguabilité et la symétrie de la fonction d'onde 132 • Le comportement des photons 133 • Le regroupement et l'anti-regroupement 134 • La symétrie de permutation dépend de l'énergie 135 • L'indistinguabilité en théorie quantique des champs 136 • Avec quelle précision la symétrie de permutation est-elle vérifiée? 137 • Les copies, les clones et les gants 138 • Résumé 139

141 6 Les rotations et les statistiques – visualiser le spin
Les particules quantiques et la symétrie 141 • Les types de particules quantiques 143 • Le spin 1/2 et les objets attachés 147 • L'extension du tour de la ceinture 150 • Les anges, le principe d'exclusion de Pauli et la dureté de la matière 153 • Le spin est-il une rotation autour d'un axe? 155 • La rotation a besoin des antiparticules 156 • Pourquoi est-il impossible de faire de l'escrime avec des faisceaux laser? 158 • Le spin, les statistiques et les objets composites 158 • La taille et la densité de la matière 159 • Un résumé sur le spin et l'indistinguabilité 160 • Les limites de la statistique quantique et quelques questions qui font toujours débat 160

162 7 Les superpositions et les probabilités – la théorie quantique sans idéologie
Pourquoi les gens sont-ils soit morts soit vivants? 163 • Les superpositions macroscopiques, la cohérence et l'incohérence 163 • La décohérence est due aux thermostats 165 • Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la diffusion 166 • Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la relaxation 168 • Un résumé sur la décohérence, la vie et la mort 170 • Qu'est-ce qu'un système? Qu'est-ce qu'un objet? 171 • L'intrication 172 • La théorie quantique est-elle non locale? Un aperçu sur le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen 173 • Curiosités et défis amusants concernant les superpositions 176 • Pourquoi est-ce que les probabilités et l'effondrement des fonctions d'onde apparaissent lors des mesures? 178 • Pourquoi $\hbar$ est-il nécessaire aux probabilités? 184 • Les va-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

riables cachées 184 • Résumé sur les probabilités et le déterminisme 186 • Quel est la différence entre l'espace et le temps? 189 • Sommes-nous de bons observateurs? 190 • Quel est le lien entre la théorie de l'information, la cryptologie et la théorie quantique? 190 • L'Univers est-il un ordinateur? 191 • Est-ce que l'Univers a une fonction d'onde? Est-ce qu'il a des conditions initiales? 192

194 8 Les couleurs et autres interactions entre la lumière et la matière

Les origines de la couleur 194 • Déterminer la composition des étoiles en utilisant l'arc-en-ciel 205 • Qu'est-ce qui détermine les couleurs des atomes? 206 • La forme des atomes 210 • La taille des atomes 211 • L'hydrogène relativiste 213 • Les équations d'onde relativistes – à nouveau 214 • Une première familiarisation avec l'équation de Dirac 217 • L'antimatière 217 • Les particules virtuelles 219 • Curiosités et défis amusants concernant la couleur et les atomes 220 • Les propriétés des matériaux 222 • Un défi de taille: la force de l'électromagnétisme 222 • Un résumé sur les couleurs et les matériaux 224

225 9 Pour résumer la physique quantique

Les résultats physiques de la théorie quantique 225 • Résultats concernant le mouvement des particules quantiques 226 • Réalisations en termes d'exactitude et de précision 229 • La théorie quantique est-elle magique? 231 • La théorie quantique est exacte, mais elle peut faire mieux 231

233 A Les unités, les mesures et les constantes

Les unités du SI 233 • La signification de la mesure 236 • Les unités naturelles de Planck 237 • Les autres systèmes d'unités 238 • Curiosités et défis amusants concernant les unités 240 • La précision et l'exactitude des mesures 241 • Les limites de la précision 243 • Les constantes physiques 243 • Nombres utiles 251

252 B Les nombres et les espaces vectoriels

Les nombres en tant que structures mathématiques 253 • Les nombres complexes 254 • Les quaternions 257 • Les octonions 263 • D'autres types de nombres 265 • Des espaces vectoriels aux espaces de Hilbert 265 • Curiosités mathématiques et défis amusants 268

270 Indices et solutions des défis

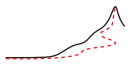
278 Bibliographie

295 Crédits

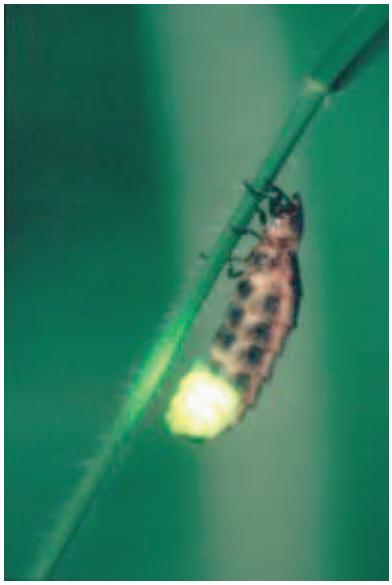
Remerciements 295 • Crédits filmographiques 296 • Crédits photographiques 296

300 Index des noms

307 Index des sujets

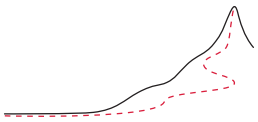


Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Le Quantum de Changement

En poursuivant notre recherche pour comprendre comment les choses se déplacent,
nous découvrons qu'il existe une valeur minimale pour le changement dans la nature,
laissant entendre que le mouvement est flou,
que les boites ne sont jamais hermétiques,
que la matière est composée d'unités élémentaires,
et que la lumière et les interactions sont des courants de particules.
La valeur minimale pour le changement explique pourquoi l'antimatière existe,
pourquoi les particules ne sont pas comme les gants,
pourquoi les duplicateurs n'existent pas,
pourquoi les probabilités sont raisonnables,
et comment se forment toutes les couleurs de la nature.



Chapitre 1

L'action minimale – la théorie quantique pour les poètes

> Natura [in operationibus suis] non facit saltus.**
>
> XVe siècle

À ce stade de notre ascension de la montagne mouvement nous avons déjà franchi trois étapes. Nous avons traversé la mécanique de Galilée (la description du mouvement pour les enfants), ensuite nous avons poursuivi avec la relativité d'Einstein (la description du mouvement pour les amateurs de science-fiction), et nous avons finalement exploré l'électrodynamique de Maxwell (la description du mouvement pour les entrepreneurs). Ces trois descriptions classiques du mouvement sont impressionnantes, belles et utiles. Pourtant, elles ont un petit défaut: elles sont fausses. La raison en est simple: aucunes d'entre elles ne décrit *la vie*. Chaque fois que l'on observe une fleur ou un papillon, tels que ceux de la Figure 2, on prend plaisir aux couleurs éclatantes, au mouvement, à la senteur sauvage, à la forme douce et délicate ou aux détails magnifiques de leurs symétries. Pourtant, nous savons que

▷ La physique classique ne peut expliquer aucune longueur caractéristique, ni aucune échelle de temps que l'on observe dans la nature.

Or, les fleurs et les animaux – mais également de nombreux systèmes inanimés – ont des tailles caractéristiques, des échelles de grandeurs et des proportions; ils ont aussi des rythmes caractéristiques. Mais il se trouve que la physique classique ne peut pas expliquer leur origine, parce que

▷ Les constantes classiques de la nature (la constante de gravitation G, la constante des gaz parfaits R, la vitesse de la lumière c, la permittivité diélectrique du vide ε_0 et la perméabilité magnétique du vide μ_0) ne permettent pas de définir des échelles de longueur ou de temps. Et elles ne peuvent pas être utilisées pour fabriquer un mètre étalon.

En fait, les constantes classiques ne nous permettent même pas de mesurer les valeurs des vitesses ou des forces, bien que les résultats de ces mesures soient des fractions de c et de c^4/G, car pour pouvoir mesurer des fractions, nous avons d'abord besoin de les

Ref. 1 ** «La nature [dans ses rouages] ne fait pas de sauts.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 2 Exemples de machines quantiques. (© Linda de Volder)

définir. Cependant, définir des fractions nécessite aussi des échelles de longueur ou de temps et des unités, que la physique classique ne permet pas.

Sans mesure, il n'y a pas non plus d'émotions! En effet, nos émotions sont déclenchées par nos sens. Et toutes les impressions, de même que toutes les informations que nos sens nous fournissent, sont – entre autres choses – des mesures. Puisque la physique classique ne fournit pas d'échelles de mesure, nous savons que

▷ La physique classique ne permet pas de comprendre les sens ni les émotions.

La raison pour toutes ces limitations est la suivante:

▷ La physique classique, à elle seule, ne peut pas servir à fabriquer des instruments de mesure.

Chacun de nos sens contient des instruments de mesure. Et tout instrument de mesure, de même que tout motif ou tout rythme, a besoin d'une échelle interne ou, plus généralement, d'une unité de mesure interne. Parce que la physique classique ne fournit pas d'échelle de grandeur, elle n'explique pas comment les instruments de mesure fonctionnent, ni comment les sens fonctionnent, ni comment les émotions apparaissent.

Pour comprendre les émotions et la vie, il nous faut aller *au-delà* de la physique clas-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sique. Prenez n'importe quel exemple d'une situation agréable,* tel qu'un beau ciel du soir, une chute d'eau, un enfant heureux ou une caresse. La physique classique n'est capable d'expliquer aucun des aspects de la situation. Premièrement, les couleurs et leur origine demeurent mystérieuses. Deuxièmement, toutes les formes, les tailles et les proportions demeurent mystérieuses. Troisièmement, on ne peut pas comprendre le chronométrage et la durée des processus impliqués. Quatrièmement, toutes les sensations et les émotions produites par la situation demeurent mystérieuses. Pour comprendre et expliquer ces aspects, nous avons besoin de la *théorie quantique*. En fait, nous découvrirons que *la vie* et que *toutes les formes de plaisir* sont des exemples de mouvements quantiques. Les émotions sont des processus quantiques.

Défi 2 e

Aux premiers jours de la physique, l'impossibilité de décrire la vie et le plaisir n'était pas vue comme une lacune, parce que ni les sens, ni les propriétés des matériaux, ni les échelles de grandeur n'étaient perçus comme ayant un rapport avec le mouvement. Et de toute façon, le plaisir n'était pas considéré comme un sujet d'investigation sérieux pour le chercheur respectable. Aujourd'hui, la situation est différente. Au cours de notre aventure, nous avons appris que nos sens du temps, de l'ouïe, du toucher, de l'odorat et de la vue étaient principalement des *détecteurs de mouvement*. Sans mouvement, les sens n'existeraient pas. De plus, tous les détecteurs sont faits de matière. Lors de notre exploration de l'électromagnétisme, nous avons commencé à comprendre que toutes les propriétés de la matière étaient dues aux mouvements de constituants électriquement chargés. La densité, la rigidité, les couleurs et toutes les autres propriétés des matériaux découlent du comportement électromagnétique des pièces de lego qui composent la matière: les molécules, les atomes et les électrons. Donc, les propriétés de la matière sont également des conséquences du mouvement. De plus, nous avons vu que ces constituants minuscules n'étaient *pas* décrits correctement par l'électrodynamique classique. Nous avons découvert que même la lumière ne se comportait pas de façon classique. Par conséquent, l'incapacité de la physique classique à décrire la matière, la lumière et les sens est bel et bien due à ses limitations intrinsèques.

Vol. I, page 411

Vol. III, page 231

Vol. III, page 247

Vol. III, page 149

En fait, il est possible de faire remonter l'origine de tous les échecs de la physique classique à une seule découverte fondamentale faite en 1899 par Max Planck:**

Ref. 2

▷ Dans la nature, on n'observe pas de valeur d'action plus petite que $\hbar = 1,06 \cdot 10^{-34}$ Js.

Toutes les tentatives pour observer des valeurs d'action physique plus petite que celle-ci,

* La photographie de la page 15 montre une femelle de ver luisant, *Lampyris noctiluca*, comme on en trouve couramment au Royaume Unis (© John Tyler, www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm).

** Max Planck (1858 – 1947), professeur de physique à Berlin, était une figure centrale en thermodynamique et en physique moderne. Il découvrit et nomma la *constante de Boltzmann k* et le *quantum d'action h*, souvent appelée la *constante de Planck*. Son introduction de l'hypothèse quantique a donné naissance à la théorie quantique. Il fit également connaître les travaux d'Einstein auprès de la communauté scientifique, et il arrangea ensuite un poste pour lui à Berlin. Il reçut le prix Nobel de physique en 1918. Il était une figure importante au sein des institutions scientifiques allemandes. Il était également l'une des rares personnes à avoir le courage de dire *face-à-face* à Adolf Hitler que l'idée de renvoyer les professeurs juifs était mauvaise. (Il reçut un déchaînement de colère en réponse.) Connu pour être modeste, avec de nombreuses tragédies dans sa vie personnelle, il était estimé par tous ceux qui le connaissaient.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

échouent.* Autrement dit, dans la nature, comme dans un bon film, il y a toujours de l'action. L'existence d'une valeur minimale pour l'action (ce que l'on appelle le *principe quantique*) contraste franchement avec la physique classique. (Pourquoi?) Malgré tout, le principe quantique a passé avec succès d'innombrables tests expérimentaux, dont nous rencontrerons un grand nombre lors de cette étape de notre ascension de la montagne. Par-dessus tout, le principe quantique n'a jamais échoué à un seul test. La constante fondamentale $\hbar$, que l'on prononce «hache-barre», s'appelle le *quantum d'action*, ou alternativement la *constante de Planck*. Planck découvrit le principe quantique alors qu'il étudiait les propriétés de la lumière incandescente, c.-à-d. de la lumière émanant des objets chauds. Mais le principe quantique s'applique également au mouvement de la matière, et même, comme on le verra plus tard, au mouvement de l'espace vide, tel que les ondes gravitationnelles.

Défi 3 e

Vol. III, page 149

Le principe quantique établit qu'aucune expérience ne peut mesurer une action plus petite que $\hbar$. Pendant longtemps, Einstein essaya de concevoir des expériences pour surmonter cette restriction. Mais toutes ses tentatives se soldèrent par des échecs: la nature ne le permet pas, comme Bohr le démontra maintes et maintes fois. De nombreux autres chercheurs firent le même constat.

Rappelons-nous qu'en physique, comme au cinéma, l'action est une mesure du *changement* qui se produit dans un système. Le principe quantique peut donc se reformuler en:

Vol. I, page 248

▷ Dans la nature, il n'est pas possible d'observer un changement plus petit que $\hbar = 1,06 \cdot 10^{-34}$ Js.

Par conséquent, une action minimale implique qu'*il existe une valeur minimale pour le changement dans la nature*. Lorsque l'on compare deux observations, il y aura toujours quelque chose de changé entre les deux. Pour cette raison, le quantum d'action serait peut-être mieux nommé le *quantum de changement*.

Est-il possible qu'un changement minimal puisse réellement exister dans la nature? Pour accepter l'idée, il nous faut explorer trois points, détaillés dans le Tableau 1. Il nous faut montrer qu'un changement plus petit n'est *jamais observé* dans la nature; il nous faut montrer que des valeurs de changement plus petites ne *peuvent jamais* être observées; et finalement, il nous faut montrer que *toutes les conséquences* de ce changement minimal, aussi bizarres qu'elles puissent paraître, s'appliquent à la nature. En fait, cette exploration constitue l'ensemble de la physique quantique. Par conséquent, tout ce que nous faisons

* En fait, cette histoire est une légère simplification: la constante introduite initialement par Planck était la constante (non réduite) $h = 2\pi\hbar$. Le facteur 2π qui conduisit au principe quantique final, fut ajoutée quelques temps plus tard, par d'autres chercheurs.

Cette approche de la théorie quantique, quelque peu non conventionnelle, mais utile sur le plan didactique, est due à Niels Bohr. De nos jours, elle est rarement rencontrée dans la littérature, malgré sa simplicité.

Ref. 3, Ref. 4

Niels Bohr (Copenhague, 1885 – Copenhague, 1962) fut l'une des grandes figures de la physique moderne. Un penseur audacieux et un homme poli, il fit de l'Université de Copenhague le nouveau centre de développement de la théorie quantique, surpassant Göttingen. Il développa la description de l'atome en termes de théorie quantiques, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1922. Il dut fuir le Danemark en 1943 après l'invasion allemande, à cause de son origine juive, mais il y retourna après la guerre, continuant d'y attirer les meilleurs physiciens du monde.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

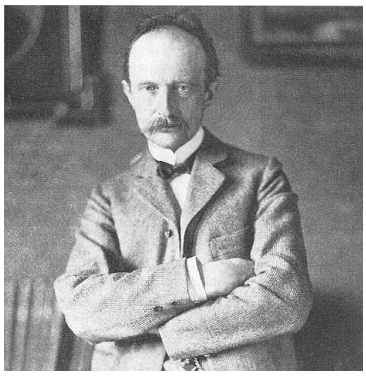


FIGURE 3 Max Planck (1858 – 1947)

FIGURE 4 Niels Bohr (1885 – 1962)

TABLEAU 1 Comment se convaincre soi-même, ainsi que les autres, qu'il y a une action minimale (un changement minimal) $\hbar$ dans la nature. Comparez ce tableau avec les deux tableaux du volume II, celui concernant la vitesse maximale à la page 26, et celui concernant la force maximale à la page 109.

AFFIRMATION	VÉRIFICATION
La valeur minimale $\hbar$ de l'action est la même pour tous les observateurs.	Vérifier toutes les observations.
Aucune valeur locale de changement (d'action) $< \hbar$ n'est observée.	Vérifier toutes les observations.
Aucune valeur locale de changement (d'action) $< \hbar$ ne peut être produite.	Vérifier toutes les tentatives.
Aucune valeur locale de changement (d'action) $< \hbar$ ne peut pas même être imaginée.	Résoudre tous les paradoxes.
La valeur minimale $\hbar$ de changement local (d'action locale) est un principe de la nature.	En déduire la théorie quantique.
	Montrer que toutes les conséquences, aussi bizarres soient-elles, sont confirmées par l'observation.

dans le reste de cette étape de notre aventure, est de procéder à ces vérifications. Mais avant d'explorer certaines expériences qui confirment l'existence d'un changement minimal, nous allons commencer par présenter quelques-unes de ses conséquences les plus surprenantes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les effets du quantum d'action sur le repos

Puisque l'action est une mesure du changement, une action observable minimale signifie que deux observations successives d'un même système diffèreront toujours d'au moins $\hbar$. Dans tout système, il se passe toujours *quelque chose*. Par conséquent, nous trouvons que

▷ Dans la nature, *il n'y a pas de repos*.

Page 16 Tout bouge, tout le temps, au moins un petit peu. *Natura facit saltus.** Il est vrai que ces sauts sont minuscules, puisque $\hbar$ est trop petit pour être observable par l'un quelconque de nos sens. Néanmoins, le repos n'est observable que sur le plan macroscopique, et seulement en tant que moyenne, sur un temps long ou sur un grand nombre de particules. Par exemple, le quantum d'action implique que dans une montagne (l'archétype d'un système au repos) tous les atomes et les électrons s'activent en permanence. En bref,

▷ Il y a du mouvement *à l'intérieur de la matière*.

Puisqu'il a une action minimale pour tous les observateurs, et puisqu'il n'y a pas de repos, on en déduit que

▷ Dans la nature *il n'y a pas de mouvement parfaitement rectiligne ou parfaitement uniforme*.

Oubliez tout ce que vous avez appris jusqu'à maintenant: le mouvement inertiel est une approximation! Un objet ne peut se déplacer en suivant une trajectoire en ligne droite et uniforme que de façon approximative, et seulement s'il est observé sur de longues distances ou sur une longue période de temps. Nous verrons plus tard que plus l'objet est Défi 4 e massique, plus l'approximation est bonne. (Pouvez-vous le confirmer?) Donc, les observateurs *macroscopiques* peuvent continuer à parler de symétries de l'espace-temps, et la relativité *restreinte* peut se réconcilier avec la théorie quantique.

De même, la *chute libre* (le mouvement le long d'une géodésique) n'existe qu'en tant que moyenne sur une longue période. Donc, la relativité *générale*, qui est basée sur l'existence d'observateurs en chute libre, ne peut pas être correcte quand elle concerne des actions de l'ordre de $\hbar$. En effet, la réconciliation du principe quantique avec la relativité générale, et donc avec l'espace courbe, est un grand défi. (La solution est simple uniquement dans le cas des champs faibles de la vie quotidienne.) Les questions que cela soulève sont tellement déconcertantes qu'elles constituent une étape indépendante à la fin de notre aventure. Nous allons donc d'abord explorer les situations qui ne font pas intervenir la gravité.

Les conséquences du quantum d'action pour les objets

Ne vous êtes-vous jamais demandé pourquoi les feuilles sont vertes? Vous savez sans doute qu'elles sont vertes parce qu'elles absorbent la lumière bleu (les petites longueurs

* «La nature fait des sauts.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

d'ondes) et la lumière rouge (les grandes longueurs d'ondes), tout en permettant à la lumière verte (les longueurs d'ondes intermédiaires) de se réfléchir. Comment se peut-il qu'un système puisse éliminer le petit et le grand, tout en laissant passer ce qu'il y a entre les deux? Pour ce faire, les feuilles doivent, d'une façon ou d'une autre, *mesurer* la fréquence. Mais nous avons vu que la physique classique ne permettait pas de mesurer les intervalles de temps ou de longueur, car toute mesure nécessite une unité de mesure, et
Vol. I, page 439 la physique classique ne permet pas de définir de telles unités. D'autre part, il ne faut que quelques lignes pour confirmer qu'avec l'aide du quantum d'action $\hbar$ (et de la constante de Boltzmann k, toutes les deux découvertes par Planck), il est possible de définir les unités fondamentales pour *toutes* les grandeurs mesurables, y compris pour le temps et donc pour les fréquences. (Pouvez-vous trouver une combinaison de la vitesse de la lumière c,
Défi 5 e de la constante de gravitation G et du quantum d'action $\hbar$ qui produise une durée? Cela ne prendra que quelques minutes.)

En bref, les mesures sont possibles uniquement parce que le quantum d'action existe:

▷ Toutes les mesures *sont des effets quantiques*.

Lorsque Planck se rendit compte que le quantum d'action permettait de définir toutes les unités de la nature, il devint heureux comme un gamin. Il reconnut sur le champ qu'il venait de faire une découverte fondamentale, même si, en 1899, la théorie quantique n'existait pas encore. Il en parla même à Erwin, son fils de sept ans, alors qu'il marchait
Ref. 5 avec lui dans les bois autour de Berlin. Planck expliqua à son fils qu'il venait de faire une découverte aussi importante que celle de la gravitation universelle. En effet, Planck savait qu'il venait de trouver la clef qui permettrait de comprendre un grand nombre des effets restant encore inexpliqués à l'époque.

▷ Dans la nature, *toutes les durées et toutes les fréquences sont dues au quantum d'action*.

Tous les processus qui prennent du temps sont des processus quantiques. Si vous préférez, *attendre* est un effet quantique! En particulier, sans le quantum d'action, les oscillations et les ondes ne pourraient pas exister:

▷ Toute couleur est un effet quantique.

Mais ce n'est pas tout. Planck réalisa également que le quantum d'action nous permettait de comprendre la *taille* de toutes choses:

▷ Toute taille est un effet quantique.

Défi 6 f Pouvez-vous trouver la combinaison de c, G et $\hbar$ qui conduit à une longueur? Avec le quantum d'action, il devint finalement possible de déterminer la taille maximale des
Vol. I, page 338 montagnes, des arbres et des êtres humains. Planck savait que le quantum d'action confirmait ce que Galilée avait déduit bien longtemps avant lui: que les tailles étaient dues à des échelles fondamentales, minimales de la nature.

Max Planck comprit également que le quantum d'action $\hbar$ était la *dernière constante*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

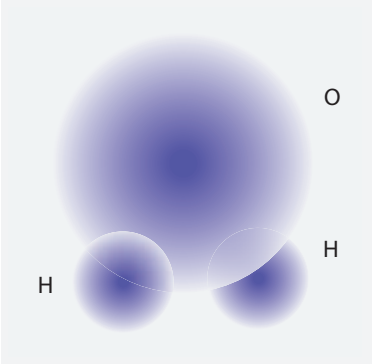


FIGURE 5 Représentation par un artiste d'une molécule d'eau composée de deux atomes d'hydrogène (H) et d'un atome d'oxygène (O).

manquante de la nature. Avec $\hbar$, il devient possible de définir une unité *naturelle* pour *toutes* les propriétés observables de la nature. Ensemble, c, G et $\hbar$ permettent de définir des unités qui sont indépendantes d'une culture ou d'une civilisation (même des extraterrestres pourraient les comprendre).* En bref, $\hbar$ permet de comprendre *toutes* les observables. C'est pourquoi, avec $\hbar$ il est possible de dessiner le diagramme de la Figure 1 qui englobe *tous* les mouvements de la nature, et donc *toute* la physique. Dans notre environnement, la taille de tous les objets dépend de (et est due à) la taille des atomes. Mais il se trouve que la taille des atomes est une conséquence directe du quantum d'action. Pouvez-vous dériver une approximation de la taille des atomes, sachant qu'elle est donnée par le mouvement des électrons, de masse m_e et de charge e, contraints par le quantum d'action? Cette formule simple a été découverte en 1910 par Arthur Erich Haas, 15 ans avant que la théorie quantique ne soit formulée.

Défi 8 e

▷ Les tailles des atomes sont des effets quantiques.

À l'époque, Haas fut largement ridiculisé.** De nos jours, sa formule sur la taille des atomes se trouve dans tous les manuels, y compris celui-ci. Parce qu'il détermine la taille des atomes, le quantum d'action a une autre conséquence importante:

Page 211

▷ Les *voyages de Gulliver* sont impossibles.

Il n'existe pas de personnes minuscules, ni de géants. Classiquement, rien ne s'oppose à l'idée, mais le quantum d'action l'en empêche. Pouvez-vous fournir un argument détaillé?

Défi 9 e

Mais si le repos n'existe pas, comment les *formes* peuvent-elles exister? N'importe quelle forme de la vie quotidienne, y compris celle d'une fleur, est le résultat de consti-

* En fait, il est également possible de définir toutes les unités de mesure en termes de la vitesse de la lumière c, de la constante de gravitation G et de la charge de l'électron e. Pourquoi ceci n'est-il pas entièrement satisfaisant?

Défi 7 e

** Avant la découverte de $\hbar$, la seule échelle de longueur simple pour l'électron était la combinaison $e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2) \approx 3\,\mathrm{fm}$, ce qui est dix mille fois plus petit qu'un atome. Soulignons que toute échelle de longueur contenant e est un effet quantique, et non pas une échelle de longueur classique, parce que e est le quantum de charge électrique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 6 Max Born (1882 – 1970)

tuants qui restent *au repos* les uns par rapport aux autres. Or, toutes les formes résultent d'interactions entre les constituants de la matière, comme le montrent très clairement les formes des molécules. Mais comment se fait-il qu'une molécule, telle que la molécule d'eau H_2O, illustrée sur la Figure 5, puisse avoir une forme? En réalité, une molécule n'a pas une forme *figée*, mais sa forme fluctue, comme on pourrait s'y attendre d'après le quantum d'action. Malgré les fluctuations, toutes les molécules ont bien une forme *moyenne*, parce que des angles et des distances différentes correspondent à des énergies différentes. Une fois de plus, ces valeurs moyennes pour les longueurs et les angles existent uniquement parce que le quantum d'action conduit à des échelles fondamentales de longueur dans la nature. Sans le quantum d'action, il n'y aurait *pas* de formes dans la nature:

▷ Toutes les formes sont des effets quantiques.

Toute les formes de la vie quotidienne sont dues aux formes des molécules, ou à leurs généralisations.

La *masse* d'un objet est également une conséquence du quantum d'action, comme nous le verrons plus loin. Puisque toutes les propriétés des matériaux (telles que la densité, la couleur, la rigidité ou la polarisabilité) se définissent par des combinaisons d'unités de longueur, de temps et de masse, nous en déduisons que

▷ Toutes les propriétés des matériaux découlent du quantum d'action.

En bref, le quantum d'action détermine la taille, la forme, la couleur, la masse et toutes les autres propriétés des objets, depuis les pierres jusqu'à la crème fouettée.

Pourquoi «quantique»?

Nous sommes entourés d'effets quantiques de toutes parts. Cependant, le quantum d'action est si petit que ses effets sur le *mouvement* apparaissent principalement (mais pas exclusivement) pour les systèmes *microscopiques*. L'étude de tels systèmes était dénommée *mécanique quantique* par Max Born, l'un des principaux contributeurs dans le

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 2 Quelques petit systèmes en mouvement et les valeurs de l'action que l'on observe pour leurs changements.

SYSTÈME ET CHANGEMENT	ACTION	MOUVEMENT
La lumière		
La plus petite quantité de lumière absorbée par une surface colorée	$1\,\hbar$	quantique
Le plus petit impact lorsque la lumière se réfléchie sur un miroir	$2\,\hbar$	quantique
La plus petite quantité de lumière visible consciemment	$\approx 5\,\hbar$	quantique
La plus petite quantité de lumière absorbée par un pétale de fleur	$1\,\hbar$	quantique
Le noircissement d'un film photographique	$\approx 3\,\hbar$	quantique
Un flash photographique	$\approx 10^{17}\,\hbar$	classique
L'électricité		
Un électron éjecté d'un atome ou d'une molécule	$\approx 1-2\,\hbar$	quantique
Un électron arraché d'un métal	$\approx 1-2\,\hbar$	quantique
Le mouvement d'un électron à l'intérieur d'un microprocesseur	$\approx 2-6\,\hbar$	quantique
Le transport d'un signal par les nerfs, d'une molécule à la suivante	$\approx 5\,\hbar$	quantique
L'écoulement du courant électrique dans un éclair	$\approx 10^{38}\,\hbar$	classique
Les matériaux		
Séparer deux atomes voisins dans le fer	$\approx 1-2\,\hbar$	quantique
Casser une barre d'acier	$\approx 10^{35}\,\hbar$	classique
Le processus élémentaire de supraconductivité	$1\,\hbar$	quantique
Le processus élémentaire dans les transistors	$1\,\hbar$	quantique
Le processus élémentaire de magnétisation	$1\,\hbar$	quantique
La chimie		
Une collision entre atomes dans un liquide à température ambiante	$1\,\hbar$	quantique
Une oscillation de la forme d'une molécule d'eau	$\approx 1-5\,\hbar$	quantique
Le changement de forme d'une molécule, ex. lors d'une réaction chimique	$\approx 1-5\,\hbar$	quantique
Une seule réaction chimique frisant un cheveu	$\approx 2-6\,\hbar$	quantique
Séparer deux molécules de mozzarella	$\approx 300\,\hbar$	quantique
Sentir une seule molécule odorante	$\approx 10\,\hbar$	quantique
Brûler le carburant dans un cylindre lors de l'explosion d'un moteur de voiture	$\approx 10^{37}\,\hbar$	classique
La vie		
Une molécule d'air frappant le tympan de l'oreille	$\approx 2\,\hbar$	quantique
Le plus petit signal sonore détectable par l'oreille	Défi 10 pe	
Une seule étape de la duplication de l'ADN lors d'une division cellulaire	$\approx 100\,\hbar$	quantique
La fertilisation d'un ovule	$\approx 10^{14}\,\hbar$	classique
La plus petite étape dans un moteur moléculaire	$\approx 5\,\hbar$	quantique
Le déplacement d'un spermatozoïde le long d'une cellule	$\approx 10^{15}\,\hbar$	classique
Une division cellulaire	$\approx 10^{19}\,\hbar$	classique
Le battement d'aile d'une mouche des fruits	$\approx 10^{24}\,\hbar$	classique
Une personne marchant sur une longueur équivalente au corps humain	$\approx 2 \cdot 10^{36}\,\hbar$	classique
Les noyaux et les étoiles		
Une réaction de fusion nucléaire dans une étoile	$\approx 1-5\,\hbar$	quantique
L'explosion produisant un sursaut de rayons gamma	$\approx 10^{80}\,\hbar$	classique

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

domaine.* Plus tard, le terme *théorie quantique* est devenu plus populaire.

La théorie quantique découle de l'existence de valeurs mesurables *minimales* dans la nature, généralisant l'idée que Galilée avait eu au XVIIe siècle. Comme nous l'avons vu
Vol. I, page 335
en détails un peu plus tôt, c'était l'insistance de Galilée pour les «piccolissimi quanti» (quanta minimaux) de la matière qui lui valurent tous ses ennuis. Nous allons bientôt découvrir que l'idée d'un changement minimal est nécessaire à une description précise et exacte de la matière et de la nature dans son ensemble. C'est pour cela que Born adopta le terme de Galilée pour cette nouvelle branche de la physique et l'appela «Quantentheorie» (théorie des quanta). L'anglais a adopté le mot latin singulier «quantum» au lieu du pluriel «quanta» utilisé par la plupart des autres langues.**

Notez que le terme «quantique» ne sous-entend *pas* que toutes les valeurs issues de mesures sont des *multiples* d'une valeur minimale: ceci est vrai seulement dans quelques cas.

La théorie quantique est la description des mouvements microscopiques. La théorie quantique est *nécessaire* chaque fois qu'un processus produit une action dont la valeur est du même ordre de grandeur que le quantum d'action. Le Tableau 2 montre que tous les processus à l'échelle d'un atome ou d'une molécule, y compris les processus biologiques et chimiques, sont des processus quantiques, comme c'est le cas également pour les processus d'émission et d'absorption de la lumière. Ces phénomènes ne peuvent être expliqués *que* par la théorie quantique.

Le Tableau 2 montre également que le terme «microscopique» a un sens différent lorsqu'il est utilisé par un physicien ou par un biologiste. Pour le biologiste, un système est «microscopique» s'il nécessite un microscope pour son observation. Pour le physicien, un système est *microscopique* si son action caractéristique est du même ordre de grandeur que le quantum d'action. Autrement dit, pour le physicien, si un système est microscopique, il n'est en général *même pas* visible à l'aide d'un microscope (optique). Pour rajouter à la confusion, de nos jours, certains physiciens spécialistes de la quantique utilisent le terme «mésoscopique» pour désigner leur propre classe de systèmes microscopiques, alors que d'autres utilisent «nanoscopique». Les deux termes ont été introduits seulement pour attirer l'attention et les financements: ils sont conceptuellement inutiles.

* Max Born (Breslau, 1882 – Göttingen, 1970) commença par étudier les mathématiques, puis se tourna vers la physique. Professeur à l'université de Göttingen, il fit de la ville l'un des centres mondiaux de la physique. Il développa la mécanique quantique avec ses assistants Werner Heisenberg et Pascual Jordan, pour ensuite l'appliquer à la diffusion, à la physique de l'état solide, à l'optique et aux liquides. Il fut le
Ref. 6
premier à comprendre que la fonction d'onde (la fonction d'état) décrivait une amplitude de probabilité. Plus tard, Born et Emil Wolf écrivirent ce qui est encore aujourd'hui le principal manuel d'optique. Un grand nombre de livres écrits par Born étaient des classiques et se lisaient dans le monde entier.

Born attira à Göttingen les talents les plus brillants de l'époque, recevant en tant que visiteur Hund, Pauli, Nordheim, Oppenheimer, Goeppert-Mayer, Condon, Pauling, Fock, Frenkel, Tamm, Dirac, Mott, Klein, Heitler, London, von Neumann, Teller, Wigner et des douzaines d'autres. Étant juif, Born perdit son travail en 1933 quand des criminels prirent le pouvoir du gouvernement allemand. Il émigra et devint professeur à Édinbourg, où il resta 20 ans. La physique à Göttingen ne se remit jamais de cette perte. Pour avoir élucidé la signification de la fonction d'onde, il reçut le prix Nobel de physique en 1954.

** La langue française parle plus communément de la «théorie quantique» ou de la «mécanique quantique», ou parfois encore tout simplement de la «quantique» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 7 Werner Heisenberg (1901 – 1976)

L'effet du quantum d'action sur le mouvement

Il existe un autre moyen pour caractériser la différence entre un système microscopique (quantique) et un système macroscopique (classique). Une action minimale implique que la différence entre les valeurs S de l'action d'un même système lors de deux observations successives, séparées par un intervalle de temps Δt, ne peut pas s'annuler. Nous avons

$$|S(t + \Delta t) - S(t)| = |(E \pm \Delta E)(t + \Delta t) - Et| = |E\Delta t \pm t\Delta E \pm \Delta E\Delta t| \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \qquad (1)$$

Le facteur 1/2 apparaît parce qu'une action minimale $\hbar$ implique automatiquement une indétermination de l'action de la moitié de sa valeur. Or, les valeurs de l'énergie E et du temps t, mais pas celles (positives) de ΔE ou de Δt, peuvent être ramenées à zéro si on choisit un observateur convenable. Donc, l'existence d'un quantum d'action implique que, dans tout système, l'évolution est contrainte par

$$\Delta E \Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \,, \qquad (2)$$

où E est l'énergie du système et t est son âge, de sorte que ΔE est le changement d'énergie et Δt l'intervalle de temps entre les deux observations successives.

En faisant un raisonnement similaire, on trouve que pour tout système physique, la
Défi 11 f position et la quantité de mouvement sont contraints par

$$\Delta x \Delta p \geqslant \frac{\hbar}{2} \,, \qquad (3)$$

où Δx est l'indétermination sur la position et Δp est l'indétermination sur la quantité de mouvement. Ces deux relations célèbres ont été nommées *relations d'indétermination* par leur découvreur, Werner Heisenberg.* On les appelle souvent les «relations

* On entend souvent dire que la relation d'indétermination sur l'énergie et le temps a une importance différente de celle sur la position et la quantité de mouvement. C'est une idée fausse, propagée par les anciennes générations de physiciens, qui a survécu au travers de nombreux manuels pendant plus de 70 ans.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

d'incertitude», mais ce terme est incorrect. Les quantités ne sont pas incertaines, mais *indéterminées*. À cause du quantum d'action, les observables d'un système n'ont *pas* de valeurs définies. Il n'y a pas moyen d'assigner une valeur précise à la quantité de mouvement, à la position, ou à toute autre observable d'un système quantique. Nous utiliserons le terme «relations d'indétermination» dans toute la suite de ce texte. L'habitude d'appeler la relation un «principe» est encore plus erronée.

Tout système dont l'indétermination est du même ordre de grandeur que $\hbar$ est un système quantique. Si le produit d'indétermination est beaucoup plus grand, le système est classique, et dans ce cas la physique classique est suffisante pour sa description. Donc, bien que la physique classique suppose qu'il n'y ait *pas* d'indéterminations de mesures dans la nature, un système est *classique* seulement si ses indéterminations sont *grandes* par rapport aux valeurs minimales possibles!

Autrement dit, la théorie quantique est nécessaire chaque fois que l'on essaye de mesurer une quantité avec la plus grande précision possible. En fait, chaque mesure est, en elle-même, un processus quantique. Et la relation d'indétermination implique que la précision des mesures est limitée. Le quantum d'action montre que

▷ *Il n'est pas possible d'observer le mouvement avec une précision infinie.*

Autrement dit, le monde microscopique est *flou*. Ce fait a de nombreuses conséquences importantes et de nombreuses qui sont étranges. Par exemple, si le mouvement ne peut être observé avec une précision infinie, le concept même de mouvement doit être manipulé avec beaucoup de précaution, car il existe certaines situations pour lesquelles il ne peut pas s'appliquer. Dans un sens, le reste de notre quête n'est qu'une exploration des implications de ce résultat.

En fait, tant que l'espace-temps est *plat*, il se trouve que l'on *peut* conserver le concept de mouvement pour décrire les observations, tout en restant conscient des limitations qu'implique le principe quantique.

Les surprises du quantum d'action

Le quantum d'action $\hbar$ implique que tous les mouvements sont flous. Ce manque de netteté implique à son tour l'existence de déviations de courtes durées par rapport aux

Oubliez-la tout simplement. Il est essentiel de se rappeler que les quatre grandeurs qui apparaissent dans les inégalités décrivent les propriétés *internes* du système. En particulier, t est une variable de temps déduite des changements que l'on observe à *l'intérieur* du système, et non pas la coordonnée de temps mesurée par une horloge externe. De même, la position x n'est pas la coordonnée externe d'espace, mais la position qui caractérise le système.

Ref. 7

Werner Heisenberg (1901 – 1976) était un physicien théoricien important, ainsi qu'un excellent joueur de ping-pong et de tennis. En 1925, alors qu'il n'était encore qu'un jeune homme, il développa, avec l'aide de Max Born et de Pascual Jordan, la première version de la théorie quantique, à partir de laquelle il déduisit les relations d'indétermination. Pour ces accomplissements, il reçut le prix Nobel de physique en 1932. Il travailla également dans le domaine de la physique nucléaire et celui des turbulences. Pendant la Seconde Guerre mondiale, il travailla sur le programme de fission nucléaire. Après la guerre, il publia plusieurs livres à succès sur des questions de philosophie en physique. Il se transforma lentement en un excentrique et tenta sans succès (avec l'aide, sans grande conviction, de Wolfgang Pauli) de trouver une description unifiée de la nature basée sur la théorie quantique, la «formule universelle».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

conservations de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique, dans le cas des systèmes microscopiques. Afin de rassurer tout le monde, il nous faut signaler qu'en ce qui concerne les observations de longues durée (du moins pour toutes les durées supérieures à la microseconde) la conservation reste valide. Mais dans la première partie de notre aventure, nous avons constaté que tout type de non-conservation impliquait l'existence de *surprises* dans la nature. Eh bien en voici quelques-unes.

Vol. I, page 238

Puisque le mouvement parfaitement uniforme n'existe pas, un système qui se déplacerait suivant une seule dimension (tel qu'une aiguille d'horloge) a toujours la possibilité de se déplacer un petit peu dans la direction opposée, ce qui conduit à une lecture incorrecte de la valeur. En effet, la théorie quantique prédit que les horloges ont des limitations fondamentales:

▷ Les horloges parfaites n'existent pas.

Les implications profondes de cette affirmation deviendront évidentes petit à petit.

Il est également impossible d'éviter qu'un objet fasse des petits déplacements latéraux. En fait, la théorie quantique implique que, pour être rigoureux,

▷ Ni le mouvement uniforme ni le mouvement unidimensionnel n'existent.

Cette affirmation renferme également de nombreuses surprises supplémentaires.

Les limitations quantiques s'appliquent aussi aux règles graduées servant à mesurer les longueurs. Il est impossible de garantir que la règle soit parfaitement au repos par rapport à l'objet que l'on est en train de mesurer. Donc, le quantum d'action implique une nouvelle fois, d'une part, que les mesures sont possibles, et de l'autre, que

▷ La précision des mesures est limitée.

Une autre conséquence du quantum d'action est que tout observateur inertiel ou en chute libre doit être suffisamment *volumineux*, car seuls les gros systèmes permettent de se rapprocher du mouvement inertiel. Donc,

▷ Un observateur ne peut pas être microscopique.

Si les humains n'étaient pas macroscopiques, ils ne pourraient ni observer ni étudier le mouvement.

À cause de la précision finie avec laquelle les mouvements microscopiques peuvent être observés, nous découvrons que

▷ *Le mouvement plus rapide que la lumière* est possible dans le domaine microscopique.

La théorie quantique prédit donc les *tachyons*, du moins sur des intervalles de temps courts. Pour la même raison,

▷ Le *mouvement en remontant le temps* est possible sur des temps et des dis-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tances microscopiques.

En bref, un quantum d'action implique l'existence de voyages dans le temps microscopiques. Cependant, ceci reste impossible dans le domaine macroscopique, tel que celui de la vie quotidienne.

Mais il y a plus. Imaginez une voiture en mouvement qui disparaîtrait soudainement, pour de bon. Dans une telle situation, ni la quantité de mouvement, ni l'énergie ne se conserveraient. La variation de l'action lors d'une telle disparition est plus grande que $\hbar$, de sorte que son observation contredirait même la physique classique (ce que vous pourDéfi 12 e riez sans doute vouloir vérifier). Cependant, le quantum d'action permet à une particule *microscopique*, telle qu'un électron, de disparaître pour un *court* instant, pourvu qu'elle réapparaisse par la suite:

▷ Le quantum d'action implique que rien n'est permanent dans la nature.

Le quantum d'action implique également que

▷ L'espace vide n'est pas vide.

Lorsque l'on regarde l'espace vide deux fois de suite, les deux observations étant séparées par un intervalle de temps minuscule, de l'énergie sera observée la seconde fois. Si l'intervalle de temps est suffisamment petit, le quantum d'action conduira à l'observation de rayonnement ou de particules de matière. En effet, des particules peuvent apparaître n'importe où, venant de nulle part, et disparaître juste après: la limite minimale de l'action l'impose. Pour résumer, la nature exhibe des apparitions et des disparitions de matière ou de rayonnement pour des courtes durée. Autrement dit, l'idée classique d'un vide *absolu* n'est correcte que lorsque le vide est observé sur une *longue* durée.

Le quantum d'action implique que les aiguilles d'une boussole ne peuvent pas marcher. Lorsque l'on regarde l'aiguille d'une boussole, ou même une maison, deux fois de suite, on observe généralement qu'elle reste orientée dans la même direction. Mais Défi 13 f comme l'action physique a les mêmes dimensions que le moment cinétique, une valeur minimale de l'action implique une valeur minimale pour le moment cinétique. Même un objet macroscopique a une valeur minimale pour sa rotation. Autrement dit, la théorie quantique prédit que:

▷ Tout tourne.

C'est seulement de façon approximative qu'un objet peut ne pas tourner sur lui-même, lorsque les observations sont séparées par de long intervalles de temps.

Pour les systèmes microscopiques, les limites quantiques sur la rotation ont des effets particuliers. S'il est possible d'observer l'angle de rotation (comme dans le cas des molécules) le système se comporte comme un objet macroscopique: sa position et son orientation sont floues. Mais pour un système dont l'angle de rotation ne peut pas être observé, le quantum d'action limite le moment cinétique à des multiples de $\hbar/2$. En particulier, tous les systèmes microscopiques liés (tels que les molécules, les atomes ou les

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

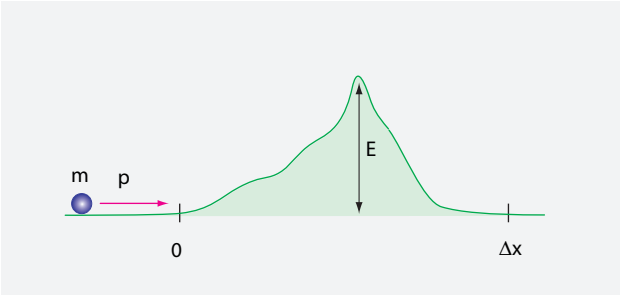


FIGURE 8 Les collines ne sont jamais assez hautes.

noyaux) possèdent des mouvements de rotation et des constituants qui tournent sur eux-mêmes.

La transformation, la vie et Démocrite

Vol. I, page 20

Au début de notre aventure, nous avons mentionné que les Grecs distinguaient trois types de changements: le transport, la croissance et la transformation. Nous avons également mentionné que Démocrite avait déduit que tous ces types de changements (dont font partie la vie et la mort) étaient en fait la même chose et qu'ils étaient dus à des mouvements d'atomes. Le quantum d'action établit exactement cette conclusion.

Premièrement, une action minimale implique que les cages des zoos sont dangereuses et que les banques ne sont pas sûres. Il faut beaucoup d'énergie pour vaincre les barreaux d'une cage. Du point de vue de la physique, les barreaux de la cage sont comme une colline d'énergie, qui ressemble à la vraie colline de la Figure 8. Imaginez qu'une particule ayant la quantité de mouvement p s'approche d'un côté de la colline, dont on supposera qu'elle a une largeur Δx.

Dans la vie quotidienne (et donc en physique classique) la particule ne sera jamais observée de l'autre côté de la colline si son énergie cinétique $p^2/2m$ est *inférieure* à la hauteur E de la colline. Mais imaginez que la quantité de mouvement manquante pour pouvoir passer par-dessus la colline, $\Delta p = \sqrt{2mE} - p$, satisfasse $\Delta x \Delta p \leqslant \hbar/2$. La particule aura alors la possibilité de vaincre la colline, malgré son énergie insuffisante. Le quantum d'action implique donc qu'une colline de largeur

$$\Delta x \leqslant \frac{\hbar/2}{\sqrt{2mE} - p} \tag{4}$$

n'est *pas* un obstacle pour une particule de masse m. Mais ce n'est pas tout. Puisque la valeur de la quantité de mouvement p de la particule est elle-même indéterminée, une particule peut vaincre la colline même si la largeur de cette dernière est *plus grande* que la valeur donnée par (4) (quoique plus la colline est large, plus la probabilité est faible). Donc, n'importe quelle particule peut vaincre *n'importe quel* obstacle. C'est ce que l'on appelle l'*effet tunnel*, pour des raisons évidentes. En physique classique, le passage par effet tunnel est impossible. Avec la théorie quantique, ce tour de force est possible, parce que la fonction d'onde ne s'annule pas à l'emplacement où se trouve la colline. Plus simplement, la fonction d'onde n'est pas nulle à l'intérieur de la colline. Elle sera donc

Page 100

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

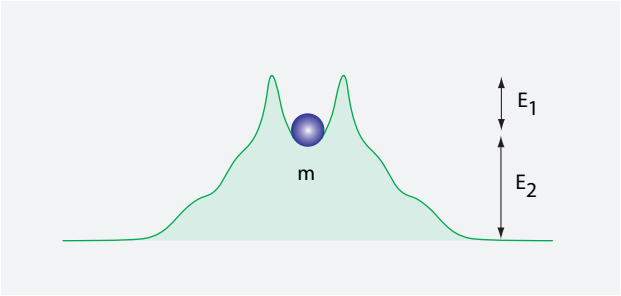


FIGURE 9 Sortir des enclos.

également non nulle derrière la colline. Par conséquent, les systèmes quantiques peuvent pénétrer ou «percer un tunnel» à travers les collines.

En bref, le principe d'action minimale implique qu'il n'y a pas de boites hermétiques dans la nature. Grâce à l'effet tunnel,

▷ La matière n'est pas impénétrable.

La pénétrabilité de toute matière contraste avec l'observation classique quotidienne. Pouvez-vous expliquer pourquoi les cages à lions fonctionnent *en dépit* du quantum d'action? Défi 14 e

D'ailleurs, le quantum d'action implique également qu'une particule, dont l'énergie cinétique serait supérieure à l'énergie correspondant à la hauteur de la colline, peut se *réfléchir* contre la colline. Cet effet est également impossible en physique classique.

Le principe d'action minimale implique aussi que les rayonnages d'une bibliothèque sont dangereux. Pourquoi? Les étagères sont des obstacles au mouvement. Un livre sur une étagère est dans la même situation que la masse de la Figure 9: la masse est encerclée par l'énergie de la colline qui l'empêche de s'échapper vers le monde extérieur, où l'énergie est moindre. Mais grâce à l'effet tunnel, il est toujours possible de s'échapper. La même situation s'applique à la branche d'un arbre, à une pointe enfoncée dans un mur ou à n'importe quoi qui serait attaché à n'importe quoi d'autre. Les choses ne peuvent jamais être assemblées de façon permanente. En particulier, nous découvrirons que tous les exemples d'émission de lumière (même la radioactivité) résultent de cet effet.

Pour résumer, le quantum d'action implique donc que

▷ La désintégration fait partie de la nature.

Notez que le phénomène de désintégration se produit souvent dans la vie quotidienne, sous un nom différent: la *décomposition*. En fait, toutes les décompositions ont besoin du quantum d'action pour leur description. De toute évidence, la cause de la décomposition est souvent classique, mais le *mécanisme* de décomposition est toujours quantique. Seuls les objets qui obéissent à la théorie quantique peuvent se décomposer. En somme, il n'y a pas de systèmes excités qui soient stable dans la nature. C'est d'ailleurs pour la même raison qu'aucune mémoire ne peut être parfaite. (Pouvez-vous le confirmer?) Ref. 8 Défi 15 e

D'un point de vue plus général, le *vieillissement* et la *mort* résultent également du quantum d'action. La mort, comme le vieillissement, est un ensemble de processus de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

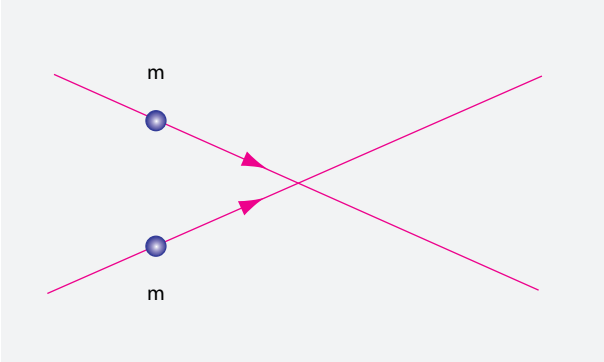


FIGURE 10 Des objets identiques dont les chemins se croisent.

décomposition. Lors de la mort, les mécanismes à l'intérieur d'un être vivant se décomposent. La décomposition est une forme de désintégration, et elle est due à l'effet tunnel. La mort est donc un processus quantique. Classiquement, la mort n'existe pas. Ce pourrait-il que ce soit la raison pour laquelle tant de gens croient en l'immortalité ou en une jeunesse éternelle?

Défi 16 e

Nous découvrirons également que le quantum d'action est la raison de l'importance donnée à l'action observable en physique classique. En fait, l'existence d'une action *minimale* est la raison du principe de *moindre* action de la physique classique.

Une action minimale implique également que la matière ne peut pas être continue, mais qu'elle doit être composée d'entités minimales. En effet, tout écoulement d'un matériau vraiment continu contredirait le principe quantique. Pouvez-vous en donner l'argument précis? Bien sûr, à ce stade de notre aventure, la non-continuité de la matière n'est plus une surprise. Mais le quantum d'action implique que même le *rayonnement* ne peut pas être continu. Comme Albert Einstein fut le premier à l'affirmer clairement: la lumière est constituée de particules quantiques.

Défi 17 e

D'une façon encore plus générale, le quantum d'action implique que, dans la nature,

▷ Tous les écoulements et toutes les ondes sont constitués de particules microscopiques.

Le terme «microscopique» (ou «quantique») est indispensable, car de telles particules ne se comportent *pas* comme des petites pierres. Nous avons déjà entrevu plusieurs différences, et nous en rencontrerons d'autres très prochainement. Pour ces raisons, il devrait y avoir un nom spécial pour les particules microscopiques. Mais pour l'instant, toutes les propositions, parmi lesquelles *quanton* est la plus populaire, n'ont pas réussi à s'imposer.

Le quantum d'action a plusieurs conséquences étranges pour les particules microscopiques. Prenez deux de ces particules ayant la même masse et la même composition. Imaginez que leurs trajectoires se croisent, et qu'à leur intersection elles s'approchent l'une de l'autre de très près, tel que le montre la Figure 10. Une action minimale implique que dans une telle situation, si la distance devient suffisamment petite, les deux particules peuvent permuter leurs rôles, sans que personne ne soit capable de les en empêcher, ni même de s'en apercevoir. Dans un volume de gaz, il est donc *impossible* (grâce au quantum d'action) de suivre les particules dans leurs déplacements, ni de distinguer

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

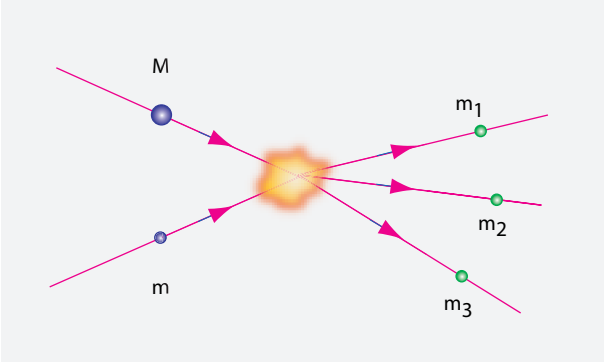


FIGURE 11 Une transformation produite par une réaction.

une particule parmi les autres. Pouvez-vous confirmer cette déduction, et en spécifier les
Défi 18 e conditions, en utilisant les relations d'indétermination? Pour résumer,

▷ Dans la nature, il est impossible de faire la distinction entre des particules identiques.

Défi 19 e Pouvez-vous deviner ce qui se passe dans le cas de la lumière?

Mais la matière mérite encore plus d'attention. Imaginez une nouvelle fois deux particules, pas nécessairement identiques, s'approchant l'une de l'autre de très près, tel que le montre la Figure 11. Nous savons que si la distance d'approche devient petite, les choses deviennent floues. Or, le principe d'action minimale fait que quelque chose peut se produire dans ce petit domaine, dans la mesure où les produits qui en ressortent ont les mêmes valeurs totales de quantité de mouvement, de moment cinétique et d'énergie que ceux qui y sont entrés. En effet, rendre impossibles de tels processus impliquerait que des actions arbitrairement petites puissent être observées, éliminant du même coup le flou
Défi 20 f de la nature, comme vous pourriez vouloir le vérifier par vous-même. En bref,

▷ Le quantum d'action permet la transformation de la matière.

On dit également que le quantum d'action permet les *réactions* entre particules. En fait, nous découvrirons que *toutes* les catégories de réactions dans la nature, y compris la respiration, la digestion et toute autres réactions chimiques ou nucléaires, sont dues uniquement à l'existence du quantum d'action.

Une catégorie de processus qui nous est tout particulièrement chère est la *croissance*. Le quantum d'action implique que toute croissance se produit par petites étapes. En effet,

▷ Tous les processus de croissance dans la nature sont des processus quantiques.

Par-dessus tout, comme nous l'avons déjà mentionné, le quantum d'action explique la vie. Seul le quantum d'action rend possible la reproduction et l'hérédité. La naissance, la sexualité et la mort sont des conséquences du quantum d'action.

Donc, Démocrite avait raison, mais en même temps, il avait tort. Il avait raison

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

lorsqu'il déduisait les constituants fondamentaux de la matière et du rayonnement. Il avait raison lorsqu'il unifiait tous les changements de la nature (depuis le transport jusqu'à la transformation et la croissance) comme étant des mouvements de particules. Mais il avait tort lorsqu'il supposait que les petites particules se comportaient comme des pierres. Comme nous le montrerons par la suite, les particules les plus petites se comportent comme des *quantons*: elles se comportent au hasard, et elles se comportent partiellement comme des ondes et partiellement comme des particules.

Le hasard – une conséquence du quantum d'action

Que se passe-t-il lorsque l'on essaye de mesurer un changement plus petit que le quantum d'action? La nature a une réponse simple: on obtient des *résultats aléatoires*. Si on conçoit une expérience qui tente de produire un changement (une action) dont la valeur serait le quart du quantum d'action, l'expérience produira, par exemple, un changement équivalent à *un* quantum d'action dans un quart des cas, et *aucun* changement dans les trois quarts des autres cas,* donnant ainsi une *moyenne* d'un quart de $\hbar$ par cas.

▷ Les tentatives pour mesurer des actions plus petites que $\hbar$ produisent des résultats aléatoires.

Si vous voulez condenser la physique quantique en une seule affirmation clef, la voici.

Le quantum d'action introduit du hasard au niveau microscopique, ce qui peut également être vu de la façon suivante. À cause des relations d'indétermination, il n'est pas possible d'obtenir une valeur précise à la fois pour la quantité de mouvement et pour la position d'une particule. De toute évidence, des valeurs précises sont également impossibles pour les constituants individuels d'un appareil expérimental ou d'un observateur. Par conséquent, les conditions initiales, à la fois pour le système et pour l'appareil expérimental, ne peuvent pas être dupliquées exactement. Le quantum d'action implique donc que chaque fois qu'une expérience est réalisée deux fois sur un système microscopique, les deux résultats seront (en général) différents. Les résultats ne pourraient être les mêmes que si le système et l'observateur étaient tous les deux exactement dans les mêmes configurations à chaque fois. Toutefois, à cause du second principe de thermodynamique, et à cause du quantum d'action, reproduire une configuration est impossible. Donc,

▷ Les systèmes microscopiques se comportent de façon aléatoire.

Bien évidemment, il y aura un résultat *moyen*, mais dans tous les cas, les observations microscopiques sont *probabilistes*. Nombreux sont ceux qui trouvent cette conclusion de la théorie quantique difficile à avaler. Mais les faits montrent que le quantum d'action implique que le comportement des systèmes quantiques est profondément différent de celui des systèmes classiques. La conclusion est inévitable:

▷ La nature se comporte de façon aléatoire.

* Dans ce contexte, «aucun changement» signifie aucun changement sur la variable physique que l'on est en train de mesurer. Plus généralement, il y a toujours du changement, mais pas nécessairement concernant la variable mesurée.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 12 Un effet quantique bien connu: comment les fenêtre des trains font-elles pour montrer deux images superposées? (Photo © Greta Mansour)

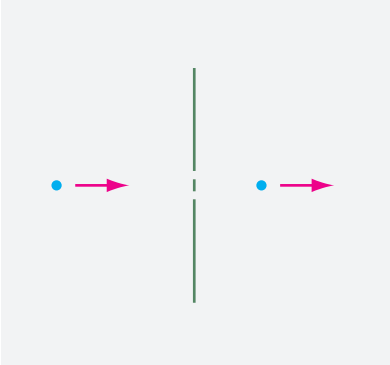


FIGURE 13 Une particule et un écran comportant deux fentes proches.

Est-il possible d'observer le caractère aléatoire dans la vie quotidienne? Oui. Toutes les *fenêtres* démontrent que la nature se comporte de façon aléatoire à l'échelle microscopique. Tout le monde sait qu'il est possible d'utiliser la fenêtre d'un train soit pour regarder le paysage *au dehors* soit, en se concentrant sur l'image réfléchie, pour observer certaines personnes intéressantes *à l'intérieur* du wagon. Autrement dit, les observations telles que celle de la Figure 12 montrent que le verre réfléchit un certain nombre de particules de lumière et en laisse passer d'autres à travers. Plus précisément, le verre réfléchit une sélection aléatoire de particules de lumière, bien que la proportion moyenne soit constante. S'agissant de ses propriétés, la réflexion partielle est similaire à l'effet tunnel. En effet, la réflexion partielle des photons sur le verre est une conséquence du quantum d'action. Rappelons une fois de plus que la situation peut *se décrire* avec la physique classique, mais que la quantité précise de réflexion ne peut pas *s'expliquer* sans la théorie quantique. Nous retiendrons que:

▷ Les quantons se déplacent de façon aléatoire.

Sans le quantum d'action, les voyages en train seraient beaucoup plus ennuyeux.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les ondes – une conséquence du quantum d'action

Le quantum d'action implique un résultat important en ce qui concerne les *trajectoires* des particules. Lorsqu'une particule voyage d'un point à un autre, il n'y a aucun moyen de déterminer par quel chemin elle est passée entre les deux points. En effet, pour pouvoir distinguer entre deux chemins possibles, mais légèrement différents, des actions plus petites que $\hbar$ devraient pouvoir être mesurées de façon fiable. En particulier, si une particule est envoyée à travers un écran ayant deux fentes suffisamment proches l'une de l'autre, comme l'illustre la Figure 13, il est impossible de dire par laquelle des deux fentes la particule est passée. Cette impossibilité est fondamentale.

Nous connaissons déjà des phénomènes de mouvement au cours desquels il n'est pas possible de dire avec précision comment quelque chose se déplace ou bien quel chemin a été suivi après les deux fentes: les *ondes* se comportent de cette façon. Toutes les ondes
Vol. I, page 314
sont soumises aux relations d'indétermination:

$$\Delta\omega\Delta t \geqslant \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad \Delta k\Delta x \geqslant \frac{1}{2}\,. \tag{5}$$

Une onde est un type de mouvement décrit par une *phase* qui change au cours de l'espace et du temps. Il se trouve que ceci reste valide pour tous les mouvements, et en particulier pour la matière.

Nous avons vu plus haut que les systèmes quantiques étaient soumis à

$$\Delta E\Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \quad \text{et} \quad \Delta p\Delta x \geqslant \frac{\hbar}{2}\,. \tag{6}$$

Nous sommes donc amenés à attribuer une fréquence et une longueur d'onde à un système quantique:

$$E = \hbar\omega \quad \text{et} \quad p = \hbar k = \hbar\frac{2\pi}{\lambda}\,. \tag{7}$$

En ce qui concerne la *lumière*, la relation entre l'énergie et la fréquence, de même que celle, équivalente, entre la quantité de mouvement et la longueur d'onde, ont été déduites par Max Planck en 1899. Durant les années qui suivirent 1905, Albert Einstein confirma que les relations étaient valides pour tous les exemples d'émission et d'absorption de lumière. En 1923 et 1924, Louis de Broglie* prédit que les relations devaient également être valables pour toutes les particules de *matière* quantiques. La confirmation expérimen-
Page 84
tale arriva quelques années plus tard. (C'est donc un autre exemple de découverte qui fut faite environ 20 ans trop tard.) En bref, le quantum d'action implique que:

* Louis de Broglie (Dieppe, 1892 – Paris, 1987), physicien et professeur à la Sorbonne. La relation entre l'énergie et la fréquence pour la lumière a valu le prix Nobel de physique à Max Planck en 1918 et à Albert Einstein en 1921. De Broglie a élargi le domaine d'application de la relation pour prédire la nature ondulatoire de l'électron (et de toutes les autres particules de matière quantiques). Ceci était le point essentiel de sa thèse doctorale. La prédiction fut confirmée expérimentalement pour la première fois quelques années plus tard, en 1927. Pour sa prédiction de la nature ondulatoire de la matière, de Broglie reçut le prix Nobel de physique en 1929. Parce qu'il était aristocrate, il ne fit plus de recherche après cela. Par exemple, ce fut Schrödinger qui mit par écrit l'équation d'onde, même si de Broglie aurait tout aussi bien pu le faire lui-même.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Les particules de matière se comportent comme des ondes.

En particulier, le quantum d'action implique l'existence d'*interférences* pour les courants de matière.

Les particules – une conséquence du quantum d'action

Le quantum d'action (le changement minimal) implique que les écoulements ne peuvent pas être arbitrairement faibles. Ceci s'applique à *tous* les écoulements. En particulier, ceci s'applique aux rivières, aux écoulements de matière solide, aux écoulements de gaz, aux faisceaux lumineux, aux écoulements d'énergie, aux écoulements d'entropie, aux écoulements de quantité de mouvement, aux écoulements de moment cinétique, aux écoulements de probabilité, aux signaux de toutes sortes, aux écoulements de charges électriques, aux écoulements de charges de couleur et aux écoulements de charges faibles.

Vol. I, page 354

L'écoulement de l'eau dans les rivières, comme tout autre écoulement de matière, ne peut pas être arbitrairement petit: le quantum d'action implique qu'il existe un écoulement de matière minimal dans la nature. Suivant la situation, l'écoulement de matière minimal peut être une molécule, un atome ou une particule plus petite. En effet, le quantum d'action est également à l'origine de l'observation d'une charge minimale dans les courants électriques. Puisque toute matière peut s'écouler, le quantum d'action implique que:

▷ Toute matière a des aspects particulaires.

De la même façon, le quantum d'action (le changement minimal) implique que la lumière ne peut pas être arbitrairement faible. Il y a un éclairage minimal dans la nature, que l'on appelle le *photon*, ou encore le *quantum de lumière*. Or, la lumière est une onde, et le même argument s'applique également à n'importe quelle autre onde. En bref, le quantum d'action implique que:

▷ Toutes les ondes ont des aspects particulaires.

Ceci a été démontré pour les ondes lumineuses, les vagues à la surface de l'eau, les rayons X, les ondes sonores, les ondes de plasma, le tourbillonnement d'un fluide, ainsi que tous les autres types d'onde qui on été observés. Il existe une exception: les ondes gravitationnelles ont finalement été observées en 2016, de nombreuses décennies après leur prédiction. On s'attend à ce que leurs aspects particulaires, les *gravitons*, existent également, bien que cela puisse prendre beaucoup de temps à démontrer à l'aide d'expériences.

En résumé, le quantum d'action affirme que:

▷ Si quelque chose bouge, c'est que cette chose est constituée de particules quantiques (de quantons).

Par la suite, nous explorerons et spécifierons la différence exacte entre une particule quantique et une petite *pierre* ou un grain de sable. Nous découvrirons que les quantons de matière se déplacent différemment, se comportent différemment lors d'une rotation

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

et se comportent différemment lors d'un échange.

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

En informatique (la science de l'information), l'unité de changement minimale s'appelle un «changement d'un bit». L'existence d'un changement minimal dans la nature implique que l'informatique peut être utilisée pour décrire la nature, et en particulier la théorie quantique. Cette analogie a fait l'objet de nombreuses recherches durant les dernières décennies et a permis d'explorer de nombreuses questions intéressantes: Le stockage illimité d'information est-il possible? L'information peut-elle être lue et copiée complètement? Est-il possible de transmettre de l'information tout en la gardant secrète? Est-il possible de transférer et de mémoriser de l'information indépendamment du bruit de fond parasite? Peut-on utiliser la physique quantique pour fabriquer un nouveau type d'ordinateurs? Pour l'instant, la réponse à toutes ces questions est négative, mais l'espoir de voir la situation changer n'a pas encore été enterré.

L'analogie entre la théorie quantique et l'informatique est limitée: l'informatique ne peut décrire que le côté «logiciel» des appareils. Pour un physicien, le côté «matériel» de la nature est central. L'aspect matériel de la nature s'invite dans la description chaque fois que la valeur même du quantum d'action $\hbar$ doit être introduite.

Lorsque nous explorerons les similarités et les différences entre la nature et l'informatique, nous découvrirons que le quantum d'action implique que les systèmes physiques macroscopiques ne peuvent pas être copiés (ou «clonés» comme disent les théoriciens de la quantique). La nature ne permet pas les copies d'objets macroscopiques. Autrement dit,

▷ Les duplicateurs parfaits n'existent pas.

Le quantum d'action interdit de rassembler et d'utiliser toutes les informations d'une manière qui permettrait de produire une copie parfaite.

L'exploration des duplicateurs nous rappellera une fois de plus que l'ordre précis dans lequel les mesures sont prises, lors d'une expérience, est important. Lorsque l'ordre des mesures peut être inversé sans affecter le résultat final, les physiciens parlent de «commutation». Le quantum d'action implique que

▷ Les observables physiques ne commutent pas.

Nous trouverons également que le quantum d'action implique que les systèmes ne
Page 172 sont pas toujours indépendants, mais qu'ils peuvent être *intriqués*. Ce terme, introduit par Erwin Schrödinger, décrit l'une des conséquences les plus absurdes de la théorie quantique. L'intrication quantique (que l'on appelle également «enchevêtrement quantique» [N.d.T.]) fait que tout dans la nature est connecté avec tout le reste. L'intrication produit des effets qui *semblent* (mais ne sont pas) plus rapides que la lumière:

▷ L'intrication produit une (fausse) forme de non-localité.

Ref. 9 L'intrication implique que la communication en toute confiance ne peut pas exister.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nous découvrirons aussi que la *décohérence* est un processus omniprésent dans la nature, et qu'elle influence tous les systèmes quantiques. Par exemple, d'une part elle permet de faire des mesures, mais de l'autre elle rend les ordinateurs quantiques impossibles.

Page 178

Curiosités et défis amusants concernant le quantum d'action

Même si on admet qu'aucune expérience faite jusqu'à ce jour ne contredit l'action minimale, il nous reste tout de même à vérifier que l'action minimale ne contredit pas la raison. En particulier, l'action minimale doit aussi être consistante avec toutes les expériences qu'il soit possible d'*imaginer*. Ceci n'est pas évident en soi-même.

* *

Défi 21 e Où se trouve l'échelle quantique dans une horloge à pendule?

* *

Lorsque des champs électromagnétiques entrent en jeu, la valeur de l'action dépend (en général) du choix du potentiel vecteur, et donc du choix de la jauge. Nous avons vu dans la partie concernant l'électrodynamique qu'un choix de jauge convenable pouvait modifier la valeur de l'action en ajoutant ou soustrayant n'importe quelle quantité désirée. Néanmoins, il y a une action minimale dans la nature. Ceci est possible parce que, en théorie quantique, les changements de jauge physique ne peuvent pas ajouter ou soustraire n'importe quelle quantité, mais seulement des multiples de *deux fois* la valeur minimale. Par conséquent, ils ne nous permettent pas de descendre en dessous de l'action minimale.

Vol. III, page 85

* *

À l'âge adulte, les plantes arrêtent leur développement dans le noir. Sans lumière, les réactions nécessaires à la croissance cessent. Pouvez-vous montrer qu'il s'agit d'un effet quantique, inexplicable si on utilise la physique classique?

Défi 22 e

* *

La plupart des processus quantiques de la vie quotidienne sont de nature électromagnétique. Pouvez-vous montrer que le quantum d'action doit aussi être valide pour les processus nucléaires, c.-à-d. pour des processus qui ne sont pas de nature électromagnétique?

Défi 23 e

* *

Est-ce que le quantum d'action est indépendant de l'observateur, même lorsque l'on s'approche de la vitesse de la lumière? Cette question est la raison pour laquelle Planck contacta le jeune Einstein, l'invitant à Berlin, et l'introduisant de ce fait à la communauté scientifique internationale.

Défi 24 e

* *

Le quantum d'action implique que les gens minuscules, tels que *Tom Pouce*, ne peuvent pas exister. Le quantum d'action implique que les fractales ne peuvent pas exister dans la

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nature. Le quantum d'action implique que la «*loi de Moore*» de l'électronique des semi-conducteurs, qui affirme que le nombre de transistors dans une puce électronique double tous les deux ans, ne peut pas être éternellement valide. Pourquoi? Défi 25 e

* *

Prenez un fer à cheval. La distance entre les deux extrémités n'est pas fixe, puisque si elles l'étaient, leur position et leur vitesse seraient connues en même temps, contredisant la relation d'indétermination. Bien sûr, ce raisonnement est également valable pour tout autre objet solide. En bref, la mécanique quantique et la relativité restreinte montrent toutes les deux que les corps rigides n'existent pas, bien que ce soit pour des raisons différentes.

* *

Le moment cinétique a les mêmes dimensions que l'action. Une action minimale implique qu'il y a un moment cinétique minimal dans la nature. Comment cela est-il possible, sachant que certaines particules sont de spin zéro, c.-à-d. qu'elles n'ont pas de moment cinétique? Défi 26 e

* *

Aurions-nous pu commencer toute la discussion sur la théorie quantique en affirmant qu'il existe un moment cinétique minimal au lieu d'une action minimale? Défi 27 e

* *

Niels Bohr, en plus de propager l'idée d'une action minimale, était également un adepte de ce que l'on appelle le *principe de complémentarité*. L'idée est que certaines paires d'observables d'un système (tel que la position et la quantité de mouvement) ont des *précisions* qui sont liées: si l'une des observables de la paire est connue avec une grande précision, l'autre observable est nécessairement connue avec une petite précision. Pouvez-vous déduire ce principe à partir de l'action minimale? Défi 28 e

Les dangers de l'achat d'une boite de haricots

Une autre façon de montrer les conséquences absurdes de la théorie quantique nous est fournie par l'avertissement ultime des produits de consommation, qui, selon certains avocats bien informés, devrait être inscrit sur toutes les boites de haricots et sur tous les emballages de produits. Il nous montre en détail comment notre condition humaine nous trompe profondément. Ref. 10

Avertissement: **regardez** ce produit avec précaution:

- Il rayonne de la chaleur.
- La lumière vive a pour effet de compresser ce produit.

Avertissement: **touchez** ce produit avec précaution:

- Une partie peut s'échauffer alors qu'une autre peut se refroidir, pouvant causer de graves brûlures.

Avertissement: **manipulez** ce produit avec précaution:

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

- Ce produit est constitué d'au moins 99,999 999 999 999 % d'espace vide.
- Ce produit contient des particules se déplaçant à des vitesses supérieures à un million de kilomètres par heure.
- Chaque kilogramme de ce produit contient autant d'énergie que l'explosion d'environ cent bombes nucléaires.*
- Si ce produit est mis en contact avec de l'antimatière, une explosion catastrophique se produira.
- Si on tourne ce produit sur lui-même, il émettra du rayonnement gravitationnel.

Avertissement: **transportez** ce produit avec précaution:

- La force nécessaire dépend de sa vitesse, de même que son poids.
- Ce produit émettra un rayonnement supplémentaire s'il est accéléré.
- Ce produit attire, avec une force qui augmente lorsque la distance diminue, tout autre objet qui se trouve dans son voisinage, y compris les enfants de son acheteur.

Avertissement: **entreposez** ce produit avec précaution:

- Il est impossible de garder ce produit dans un endroit spécifique tout en le maintenant immobile.
- Sauf s'il est entreposé sous terre à une profondeur de plusieurs kilomètres, avec le temps, le rayonnement cosmique rendra ce produit radioactif.
- Ce produit pourrait se désintégrer dans les 10^{35} prochaines années.
- Il pourrait se refroidir et s'élever dans les airs.
- Ce produit déforme le temps et l'espace dans son voisinage, y compris le récipient dans lequel il est entreposé.
- Même si on l'entrepose dans un récipient fermé, ce produit est influencé par, et influence, tous les autres objets de l'univers, y compris vos beaux-parents.
- Ce produit peut disparaître de son emplacement actuel et réapparaître aléatoirement à n'importe quel autre endroit de l'univers, y compris dans le garage de votre voisin.

Avertissement: **éloignez-vous** de ce produit avec précaution:

- Il atteindra sa date de péremption avant que son acheteur n'y parvienne.

Avertissement: **utilisez** ce produit avec précaution:

- Quel qu'en soit son utilisation, cela augmentera l'entropie de l'univers.
- Les constituants de ce produit sont exactement les mêmes que ceux de n'importe quel autre objet de l'univers, y compris ceux d'un poisson pourri.

Toutes ces affirmations sont correctes. L'impression d'un certain côté paranoïaque de la physique quantique est pure coïncidence.

* Une tête nucléaire standard possède un rendement explosif d'environ 0,2 mégatonne (on sous-entend ici l'explosif standard trinitrotoluène ou T.N.T.), environ treize fois le rendement de la bombe d'Hiroshima, qui était de 15 kilotonne. Une mégatonne se définie comme étant égal à 1 Pcal = 4, 2 PJ, bien que le T.N.T. délivre environ 5 % moins d'énergie que cette valeur. Une mégatonne est aussi l'énergie contenue dans environ 47 g de matière. C'est moins qu'une poignée pour la plupart des solides ou des liquides. Ref. 11

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Un résumé: la physique quantique, la loi et l'endoctrinement

La simple existence d'un quantum d'action (quantum de changement) a de nombreuses conséquences profondes: le hasard, la dualité onde-particule, la transformation de la matière, la mort et, par-dessus tout, de nouvelles habitudes de pensée.

N'est-il pas vrai que toutes les déductions que nous avons faites jusque-là, à partir du quantum d'action, semblent incorrectes, ou du moins insensées? En fait, si vous ou votre avocat énonciez certaines de ces affirmations concernant la physique quantique devant un tribunal, peut-être même sous serment, vous pourriez bien finir en prison! Pourtant, toutes les affirmations énoncées ci-dessus sont correctes: elles sont toutes confirmées par l'expérience. Et il y a encore beaucoup de surprises à venir. Vous avez peut-être remarqué que, lors des exemples précédents, nous n'avons fait aucune référence explicite à l'électricité, aux interactions nucléaires ou à la gravité. Dans ces domaines, les surprises sont encore plus étonnantes. L'observation de l'antimatière, de courants électriques sans résistance, du mouvement à l'intérieur des muscles, de l'énergie du vide, des réactions nucléaires dans les étoiles et, un jour peut-être, de l'ébullition de l'espace vide vous fascineront autant qu'elles ont fasciné, et fascinent encore, des milliers de chercheurs.

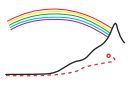
En particulier, les conséquences du quantum d'action pour l'univers primitif sont époustouflantes. Essayez simplement d'explorer pour vous-même ses conséquences dans le cas du big-bang. Ensemble, tous ces sujets vont nous guider pendant un long moment vers le but de notre aventure. Les conséquences du quantum d'action sont si étranges, si incroyables et si nombreuses, que la physique quantique pourrait être appelée, à juste titre, la description du mouvement pour le professeur *Foldingue*. Dans un sens, ceci généralise notre précédente définition de la physique quantique comme étant la description du mouvement ayant rapport au plaisir.

Défi 29 d

Malheureusement, il est parfois affirmé que «personne ne comprend la théorie quantique». Ceci est faux. En fait, c'est même pire que faux: c'est de l'endoctrinement et de la désinformation. L'endoctrinement et la désinformation sont des techniques qui empêchent les gens de prendre leurs propres décisions et de prendre plaisir à la vie. En réalité, les conséquences du quantum d'action peuvent être comprises et appréciées par tout le monde. Et pour ce faire, notre première tâche lors de notre cheminement vers le terminus de notre aventure sera d'utiliser le quantum d'action pour étudier notre standard classique du mouvement: le mouvement de la lumière.

Page 189

> Nie und nirgends hat es Materie ohne
> Bewegung gegeben, oder kann es sie geben.
> Friedrich Engels, *Anti-Dühring*.*



Ref. 12

* «Jamais et nulle part la matière n'a existé, ni ne peut exister, sans le mouvement.» Friedrich Engels (1820 – 1895) fut un des théoriciens du marxisme.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 2

La lumière – les conséquences étranges du quantum d'action

> Alle Wesen leben vom Lichte,
> jedes glückliche Geschöpfe.
> Friedrich Schiller, *Guillaume Tell*.**

Puisque toutes les couleurs des matériaux sont des effets quantiques, il devient obligatoire d'étudier les propriétés de la lumière elle-même. Si un changement minimal existe réellement, alors il doit également y avoir un éclairage minimal dans la nature. Cette conclusion avait déjà été déduite dans la Grèce antique, par exemple par Épicure (341 – 271 av. J.-C.), qui énonça que la lumière était un courant de petites particules. Le plus petit éclairage possible serait alors celui produit par une seule particule de lumière. Aujourd'hui, on appelle ces particules des *quanta de lumière* ou des *photons*. Ceci peut paraître incroyable mais Épicure lui-même aurait pu vérifier sa prédiction à l'aide d'une expérience.

Ref. 13

Comment se comportent les lampes de faible luminosité?

Ref. 14

Vers 1930, Brumberg et Vavilov ont trouvé un moyen élégant pour vérifier l'existence des photons à l'œil nu, en s'aidant seulement d'une lampe. Nos yeux ne nous permettent pas de détecter *consciemment* des photons individuels, mais Brumberg et Vavilov ont trouvé le moyen de contourner cette limitation. En fait, l'expérience est si simple qu'elle aurait pu être réalisée bien des siècles auparavant, mais personne n'avait encore eu une imagination suffisamment audacieuse pour la tenter.

Brumberg et Vavilov avaient construit un volet mécanique qui pouvait être ouvert pendant des intervalles de temps de 0, 1 s. De l'autre côté, dans une chambre complètement noire, ils ont éclairé l'ouverture avec une lumière verte extrêmement faible, environ 200 aW à 505 nm, tel que le montre la Figure 14. À cette intensité, chaque fois que le volet s'ouvre, une moyenne d'environ 50 photons peuvent passer. Ceci correspond précisément au seuil de sensibilité de l'œil. Pour réaliser leur expérience, ils ont regardé le volet ouvert de nombreuses fois. Le résultat était simple mais surprenant. Tantôt ils observaient de la lumière et tantôt ils n'en observaient pas. Qu'ils observent de la lumière ou non était complètement aléatoire. Brumberg et Vavilov en ont déduit l'explication simple suivante: aux faibles puissances de la lampe, à cause des fluctuations, le nombre de photons est supérieur au seuil de l'œil dans la moitié des cas et inférieur dans l'autre moitié. Les fluctuations se font au hasard, d'où le caractère aléatoire de la détection consciente de la

** «Tous les êtres vivent de la lumière, chaque créature bienheureuse.» Friedrich Schiller (Marbach, 1759 – Weimar, 1805), poète, auteur dramatique et historien.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

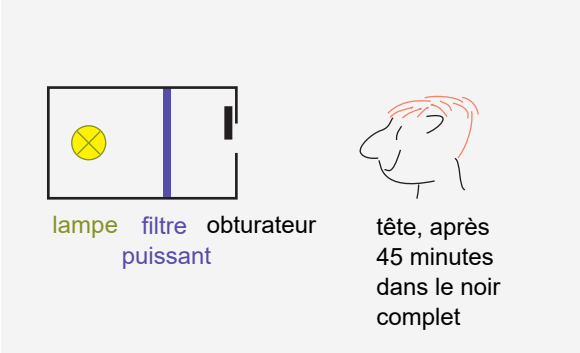


FIGURE 14 Comment ressentir les effets d'un seul photon (voir le texte).

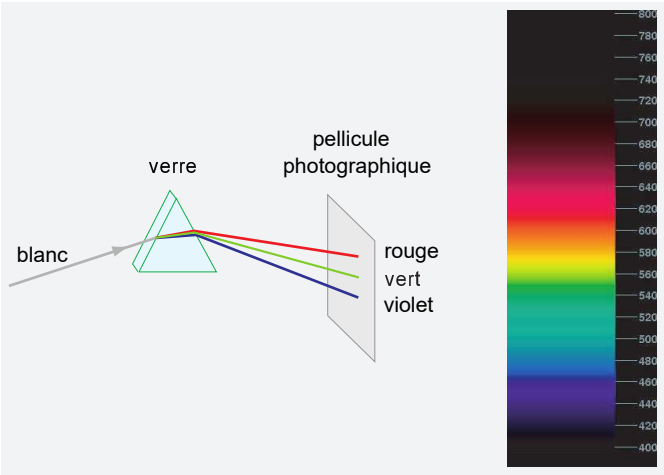


FIGURE 15 Comment un spectre de lumière blanche apparaît-il pour des distances d'écran extrêmement grandes? (Le spectre montré ici, © Andrew Young, pour une distance d'écran courte, est optimisé pour l'afficheur d'un tube à rayons cathodiques et non pour une impression couleur, tel qu'expliqué sur le site mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html.)

lumière. Ceci ne pourrait *pas* se produire si la lumière était un courant *continu*, car dans ce cas l'œil détecterait de la lumière lors de chacune des ouvertures du volet. (Pour des intensités lumineuses plus élevées, le pourcentage de cas de non-observation diminue rapidement, en accord avec l'explication fournie.)

En bref, une expérience simple démontre que:

▷ La lumière est constituée de photons.

Personne ne sait comment la théorie de la lumière aurait pu se développer si cette simple expérience avait été réalisée 100 ans, voire même 2500 ans plus tôt.

La réalité des photons devient plus convaincante lorsque l'on utilise des instruments pour nous aider. Un moyen simple est de commencer par un écran placé derrière un prisme éclairé par de la lumière blanche, comme le montre la Figure 15. La lumière se décompose en couleurs. Lorsque l'écran est placé de plus en plus loin, l'intensité de l'éclairage ne peut pas devenir arbitrairement petite, car cela irait à l'encontre du quantum d'action. Pour vérifier cette prédiction, nous avons seulement besoin d'une pellicule photographique noir et blanc. La pellicule se noirci à la lumière du jour de n'importe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

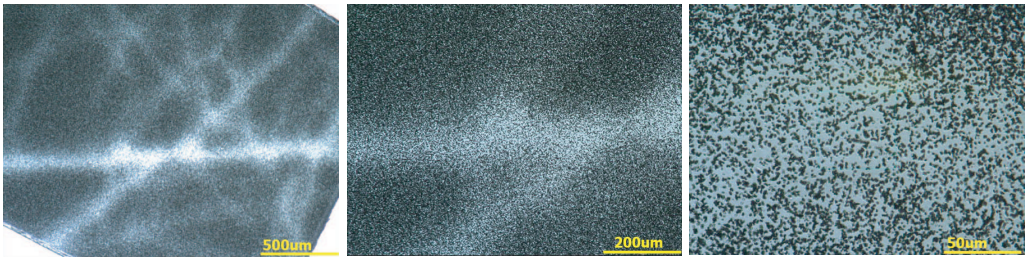


FIGURE 16 Pellicule photographique ayant été exposée, sous des grossissements de plus en plus forts. (© Rich Evans)

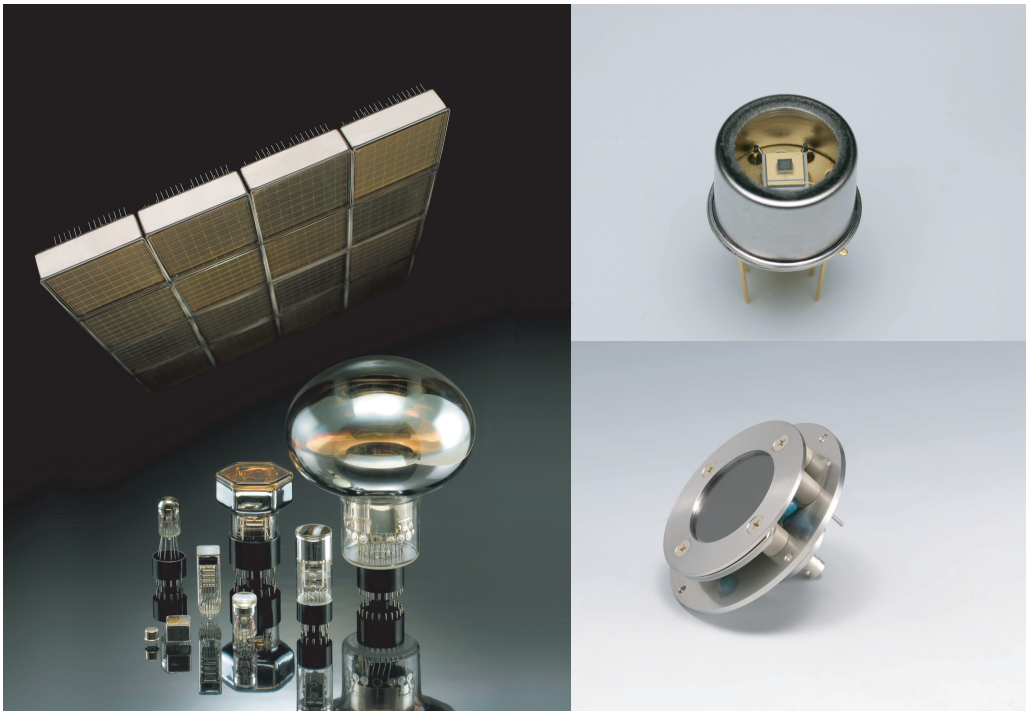


FIGURE 17 Détecteurs permettant le comptage des photons: des tubes photomultiplicateur (à gauche), une photodiode à avalanche (en haut à droite, ≈ 1 cm) et une galette de microcanaux (en bas à droite, ≈ 10 cm). (© Hamamatsu Photonics)

quelle couleur: elle devient gris foncé aux intensités moyennes et gris clair aux intensités plus faibles. Si on regarde une pellicule photographique d'un gris extrêmement clair à l'aide d'un microscope, on découvre que même sous un éclairage uniforme, le nuance de gris est en réalité composée de points noirs disposés de façon plus ou moins dense. Tous ces points ont la même taille, comme le montre la Figure 16. Ces tailles régulières suggèrent que la pellicule photographique réagit à des photons individuels. Des recherches détaillées confirment cette conjecture. Durant le XXe siècle, les fabricants de pellicules photographiques ont élucidé le mécanisme atomique sous-jacent, jusqu'au moindre de ses détails.

Les photons individuels peuvent être détectés de la façon la plus élégante en s'aidant

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

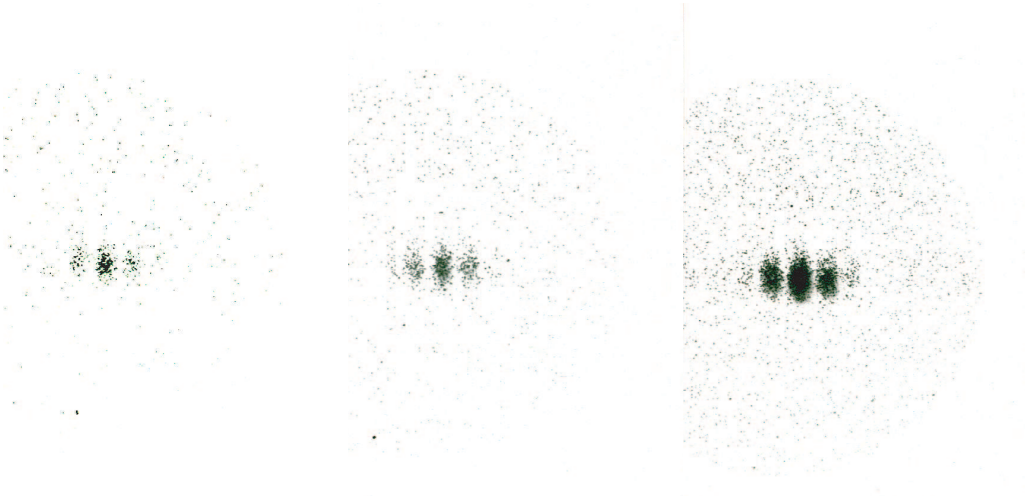


FIGURE 18 Les ondes lumineuses sont constituées de particules: observation de photons (les points noirs sur ces négatifs) lors d'une expérience des deux fentes d'Young en faible intensité, avec un temps d'exposition de 1 s, de 2 s et de 5 s, et en utilisant un amplificateur d'image. (© Delft University of Technology)

d'appareils électroniques. De tels appareils peuvent être des photomultiplicateurs, des
Ref. 15 photodiodes, des galettes de microcanaux ou les bâtonnets de la rétine de l'œil. Une sélection est présentée sur la Figure 17. Ces détecteurs montrent également que la lumière de faible intensité ne produit *pas* une couleur homogène. Au contraire, une intensité faible produit un motif aléatoire de points identiques, même lorsque l'on observe des phénomènes propres aux ondes, telles que des figures d'interférence, comme le montre la Figure 18. De nos jours, détecter et compter des photons individuels est une procédure expérimentale courante. Les compteurs de photons font partie de nombreuses installations de spectroscopie, telles que celles utilisées pour mesurer des concentrations minuscules de matériaux. Par exemple, on peut les utiliser pour détecter de la drogue dans un cheveu humain.

Toutes les expériences montrent donc le même résultat: chaque fois que des détecteurs de lumière de haute sensibilité sont construits dans le but de «voir» de façon aussi précise que possible (et donc dans des environnements aussi sombres que possible), on trouve que la lumière se manifeste par un courant de *quanta de lumière*. De nos jours, on les appelle habituellement des *photons*, un terme qui est apparu en 1926. De la lumière d'intensité faible ou élevée correspond à un courant comprenant un petit ou un grand nombre de photons.

Un exemple particulièrement intéressant de source de lumière de faible intensité est celui d'un atome individuel. Les atomes sont des sphères minuscules. Lorsque les atomes émettent de la lumière ou des rayons X, le rayonnement devrait être émis comme une onde sphérique. Mais dans toutes les expériences (voir la Figure 19 pour une installation typique), il n'a *jamais* été trouvé que la lumière émise par un atome formait une onde sphérique, contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre de la physique quotidienne. Chaque fois qu'un atome rayonnant est entouré par de nombreux détecteurs, un *seul* détecteur est déclenché. Seule la moyenne sur un grand nombre d'émissions et de dé-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

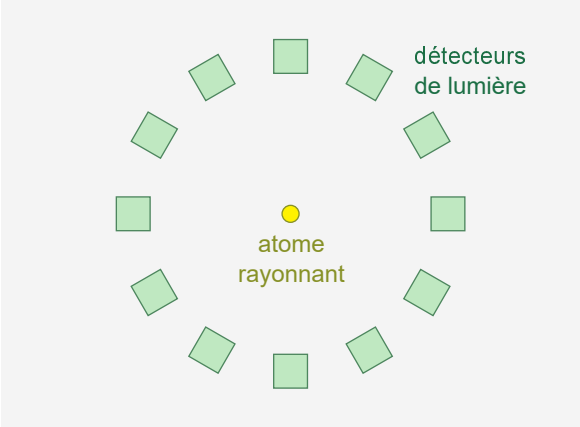


FIGURE 19 Un atome ne rayonnant qu'*un* seul photon ne déclenche qu'*un* seul détecteur et ne recule que dans *une* seule direction.

tections conduit à une forme sphérique. Les expériences montrent clairement qu'il n'est pas possible de détecter des photons partiels.

Toutes les expériences avec de la lumière de faible intensité montrent donc que la description continue de la lumière est incorrecte. Toutes ces expériences prouvent ainsi clairement que la lumière est un courant de particules, comme l'avait proposé Épicure dans la Grèce antique. Des mesures plus précises confirment le rôle du quantum d'action: chaque photon conduit à la *même* quantité de changement. Tous les photons ayant la même fréquence noircissent une pellicule ou déclenchent un écran à scintillation de la même façon. En bref, la quantité de changement induite par un seul photon est bien la quantité de changement *minimale* que la lumière puisse produire.

S'il n'y avait pas de valeur minimale pour l'action, la lumière pourrait être conditionnée en quantités arbitrairement petites. Mais la nature est différente. Plus simplement: la description classique de la lumière par un champ de potentiel vecteur $A(t, x)$ *continu* Vol. III, page 86 (ou par un champ électromagnétique $F(t, x)$ continu) dont l'évolution est décrite par un principe de moindre action, est *fausse*. Les fonctions continues ne décrivent pas les effets des particules tels qu'on les observe. Il est nécessaire de modifier la description. La modification ne doit être significative qu'aux intensités faibles, puisqu'aux intensités élevées, celles de la vie quotidienne, le Lagrangien classique décrit toutes les observations expérimentales avec une précision suffisante.*

À partir de quelles intensités la lumière cesse-t-elle de se comporter comme une onde continue? La vision humaine ne nous permet pas de distinguer consciemment des photons individuels, bien que des expériences montrent que les composants de l'œil sont Ref. 16 en principe capables de le faire. Les étoiles les plus faibles que l'on peut voir de nuit produisent une intensité lumineuse d'environ $0,6\,\mathrm{nW/m^2}$. Puisque la pupille de l'œil est petite, et comme nous ne sommes pas capables de voir des photons individuels, les photons doivent avoir des énergies plus petites que 100 aJ. L'expérience de Brumberg et Vavilov donnent une limite supérieure d'environ 20 aJ.

Une valeur exacte pour le quantum d'action de la lumière doit être déduite à l'aide

* On avait l'habitude de nommer «*quantification*» la transition entre le cas classique et le cas quantique. Ce concept, ainsi que l'idée qui se cache derrière, n'a plus qu'un intérêt historique aujourd'hui.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

d'une expérience en laboratoire. Quelques exemples sont donnés dans ce qui suit.

Les Photons

En général, toutes les expériences montrent qu'un faisceau de lumière de fréquence f, ou de pulsation ω, qui détermine sa couleur, est décrite avec précision par un courant de photons, chacun d'eux ayant la même énergie E donnée par

$$E = \hbar 2\pi f = \hbar\omega \,. \tag{8}$$

Cette relation a été déduite pour la première fois par Max Planck en 1899. Il trouva que dans le cas de la lumière, la plus petite action mesurable était donnée par le quantum d'action $\hbar$. En bref, la *couleur* est une propriété des photons. Un faisceau de lumière coloré est une averse de photons à la fréquence correspondante.

Vol. III, page 149

La valeur de la *constante de Planck* peut se déterminer à partir de mesures sur les corps noirs ou d'autres sources de lumière. Tous les résultats de ces mesures coïncident

Page 243

et donnent

$$\hbar = 1,054\,571\,726(47) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js} \,. \tag{9}$$

Cette valeur est tellement petite qu'il est facile de comprendre pourquoi les photons ne se font pas remarquer par les humains. Par exemple, un photon vert avec une longueur

Défi 30 f

d'onde de 555 nm a une énergie de 0, 37 aJ. Il est vrai que dans des conditions normales d'éclairage, les photons sont tellement nombreux que l'approximation continue d'un champ électromagnétique est très précise. Dans le noir, le manque de sensibilité du processus de traitement du signal de l'œil humain (tout particulièrement la lenteur des ré-

Ref. 16

cepteurs lumineux) rend impossible tout comptage des photons. Pourtant, l'œil n'est pas si loin que cela de la sensibilité maximale possible. À partir des chiffres donnés ci-dessus concernant les étoiles de faible intensité, il est possible d'estimer que les humains sont capables de voir consciemment, dans des conditions idéales, des flashes d'environ une

Défi 31 pe

demi-douzaine de photons. Dans des conditions normales, ce nombre est environ dix fois plus élevé.

Explorons les autres propriétés des photons. Avant tout, les photons n'ont pas de masse (au repos) mesurable, ni de charge électrique mesurable. Pouvez-vous le confir-

Défi 32 e

mer? En fait, les expériences ne peuvent fournir qu'une limite supérieure pour les deux

Ref. 17

grandeurs. La limite expérimentale supérieure pour la masse (au repos) d'un photon est actuellement de 10^{-52} kg, et pour la charge électrique elle est de $5 \cdot 10^{-30}$ fois la charge de l'électron. Ces limites sont si petites que l'on peut considérer avec certitude que la masse et la charge du photon sont toutes les deux nulles.

Nous savons qu'une lumière intense peut *pousser* les objets. Puisque l'on connaît l'énergie, l'absence de masse et la vitesse des photons, on en déduit que la quantité de

Défi 33 f

mouvement du photon est donnée par

$$p = \frac{E}{c} = \hbar\frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{ou} \quad \boldsymbol{p} = \hbar\boldsymbol{k} \,. \tag{10}$$

Autrement dit, si la lumière est composée de particules, on doit pouvoir jouer au billard

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

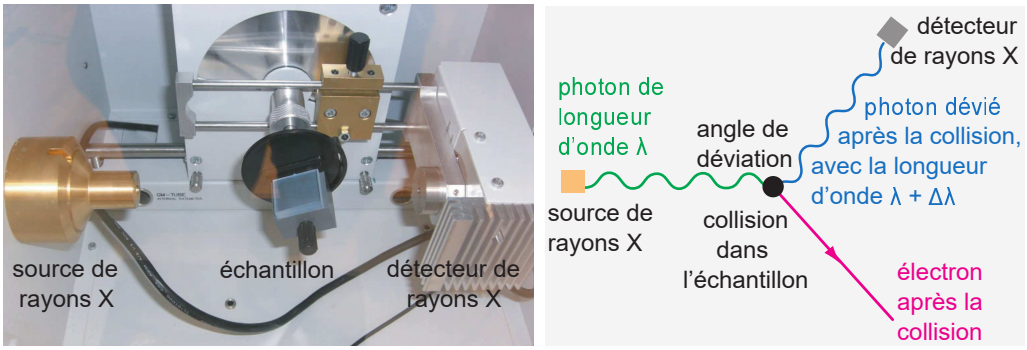


FIGURE 20 Une version moderne de l'expérience de Compton tient sur une table. L'expérience montre que les photons ont une quantité de mouvement: les rayons X (et donc les photons qui les constituent) changent de fréquence lorsqu'ils percutent les électrons de la matière, exactement de la même façon que prédit lorsque l'on considère des collisions entre particules. (© Helene Hoffmann)

avec elles. C'est en effet possible, comme l'a démontré Arthur Compton dans une expé-
Ref. 18 rience célèbre en 1923. Il dirigea des rayons X, qui sont des photons de haute énergie, sur du graphite, un matériau au sein duquel les électrons se déplacent presque librement. Il trouva que chaque fois que les électrons dans le matériau étaient percutés par les photons du faisceau de rayons X, les rayons X déviés changeaient de couleur. Son expérience est représentée sur la Figure 20. Comme on peut s'y attendre, la force de la collision dépend de l'angle de déflexion du photon. À partir du changement de couleur et de l'angle de déflexion, Compton confirma que la quantité de mouvement du photon vérifiait bien l'expression $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$.

Toutes les autres expériences sont en accord avec le fait que les photons ont une quantité de mouvement. Par exemple, lorsqu'un atome *émet* de la lumière, l'atome subit du *recul*. La quantité de mouvement se trouve être encore une fois donnée par l'expression $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$. En bref, le quantum d'action détermine la quantité de mouvement du photon.

La valeur de la quantité de mouvement d'un photon respecte la relation d'indétermination. De même qu'il n'est pas possible de mesurer exactement à la fois la longueur d'onde et la position de la crête d'une onde, il est impossible de mesurer à la fois la quantité de mouvement et la position d'un photon. Pouvez-vous le confirmer?
Défi 34 e Autrement dit, la valeur de la quantité de mouvement du photon est une conséquence directe du quantum d'action.

Depuis notre étude de la physique classique, nous savons que la lumière a une autre propriété en plus de sa couleur: la lumière peut être *polarisée*. Ceci n'est qu'un moyen compliqué pour dire que la lumière peut faire *tourner* les objets qu'elle illumine.
Vol. III, page 123 Autrement dit, la lumière a un moment cinétique orienté (principalement) le long de son axe de propagation. Qu'en est-il des photons? Les résultats des mesures montrent de façon consistante que chaque quantum de lumière transporte un *moment cinétique* donné par $L = \hbar$, que l'on appelle l'*hélicité* du photon. La grandeur physique est similaire à une autre que l'on trouve dans le cas des particules massiques: on parle donc également du *spin* d'un photon. En bref, les photons, d'une certaine manière, «tournent» sur eux-mêmes dans une direction qui est soit parallèle, soit antiparallèle à la direction de leur mouvement. Une fois de plus, l'intensité de l'hélicité du photon, son spin, n'est pas une

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

surprise: elle confirme la relation classique $L = E/\omega$ entre l'énergie et le moment cinétique, tel que nous l'avons trouvé dans la section sur l'électrodynamique classique. Notez que, contrairement à l'intuition, le moment cinétique d'un photon individuel est fixe et est donc indépendant de son énergie. Même les photons les plus énergétiques ont $L = \hbar$. Bien sûr, la valeur de l'hélicité respecte aussi la limite donnée par le quantum d'action. Les nombreuses conséquences de la valeur $\hbar$ pour l'hélicité (le spin) des photons deviendront claire dans ce qui suit.

Vol. III, page 123

Qu'est-ce que la lumière?

> La *lumière* est un mouvement luminaire de corps lumineux.
>
> Blaise Pascal*

Au XVIIe siècle, Blaise Pascal utilisait l'affirmation ci-dessus à propos de la lumière pour se moquer de certains physiciens, ridiculisant l'utilisation flagrante d'une définition circulaire. Bien sûr, il avait raison: à son époque, la définition était en effet circulaire, car aucun sens ne pouvait être donné à chacun des termes. Mais chaque fois que les physiciens étudient soigneusement une observation, les philosophes sont les perdants. Tous ces termes, à l'origine indéfinis, ont maintenant un sens bien précis et la définition circulaire est résolue. La lumière est en effet un type de mouvement. Ce mouvement peut fort justement être qualifié de «luminaire» parce que, contrairement au mouvement des objets matériels, il a la propriété unique $v = c$. Les corps lumineux, appelé *quanta de lumière* ou *photons*, sont caractérisés (et différenciés de toutes les autres particules) par leur relation de dispersion $E = cp$, par leur énergie $E = \hbar\omega$, par leur spin $L = \hbar$, par l'annulation de tous les autres nombres quantiques, et par la propriété d'être les quanta du champ électromagnétique.

En bref, *la lumière est un courant de photons*. C'est donc bien un «mouvement luminaire de corps lumineux». Les photons nous fournissent notre premier exemple d'une propriété générale du monde à petite échelle: *toutes les ondes et tous les écoulements dans la nature sont constitués de particules quantiques*. Lorsqu'elles sont en grands nombres, les particules quantiques cohérentes (les *quantons* cohérents) se comportent comme des ondes et forment des ondes. Nous verrons bientôt que ceci est le cas même pour la matière. Les quantons sont les constituants fondamentaux de *toutes* les ondes et de *tous* les écoulements, sans exception. Par conséquent, la description continue de la lumière que l'on fait dans la vie quotidienne est similaire, à bien des égards, à celle que l'on fait lorsque l'on décrit l'eau comme un fluide continu: les photons sont les atomes de la lumière, et la continuité est une approximation valide pour des grands nombres de particules. Les quantons individuels se comportent bien souvent comme des particules classiques.

Les livres de physique avaient l'habitude de discuter en détail ce que l'on appelle la *dualité onde-particule*. Soyons clair dès le départ: les quantons (les particules quantiques) ne sont *ni* des ondes classiques *ni* des particules classiques. Dans le monde microscopique, les quantons sont les objets fondamentaux.

Cependant, il reste encore beaucoup de choses qui ne sont pas claires. D'où proviennent, au sein de la matière, ces photons monochromatiques? Encore plus intéres-

* Blaise Pascal (Clermont, 1623 – Paris, 1662), était un mathématicien et physicien important jusqu'à l'âge de 26 ans, après quoi il devint théologien et philosophe.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sant: si la lumière est constituée de quantons, tous les champs électromagnétiques, même ceux qui sont statiques, doivent également être constitués de photons. Pourtant, dans un champ statique, rien ne s'écoule. Comment cette contradiction apparente est-elle résolue? Et quelles implications l'aspect particulaire a-t-il pour ces champs statiques? Quelle est la différence entre les quantons et les particules classiques? Les propriétés des photons nécessitent une étude plus approfondie.

La taille des photons

Tout d'abord, on pourrait se demander: de quoi ces photons sont-ils constitués? Toutes les expériences réalisées jusqu'à présent, poussées jusqu'à la limite actuelle d'environ 10^{-20} m, apportent la même réponse: «il est impossible de trouver quoi que ce soit». Ceci est consistant avec à la fois une masse nulle et une taille nulle des photons. En effet, on peut s'attendre intuitivement qu'un corps qui aurait une taille non nulle ait aussi une masse non nulle. Donc, bien que les expériences ne puissent donner qu'une limite supérieure, il est raisonnable d'affirmer qu'un photon a une *taille nulle*.

Une particule ayant une taille nulle ne peut pas avoir de constituants. Donc, un photon ne peut pas être subdivisé en des entités plus petites: les photons ne sont pas composites. Pour cette raison on les appelle des particules *élémentaires*. Nous donnerons bientôt d'autres arguments solides confirmant ce résultat. (Pouvez-vous en trouver un?) Néanmoins, la conclusion est étrange. Comment un photon peut-il avoir une taille nulle, ne pas avoir de constituants et, malgré tout, être *quelque chose*? C'est une question difficile et la réponse n'apparaîtra que dans le dernier volume de notre aventure. Pour l'instant, il nous faut simplement accepter la situation telle qu'elle est. Nous nous tournons donc vers une question plus facile.

Défi 35 e

Peut-on compter les photons? – La lumière compressée

> Also gibt es sie doch.
>
> Max Planck*

Nous avons vu plus haut que le moyen le plus simple pour compter des photons était de les distribuer sur un grand écran pour ensuite les absorber. Mais cette méthode n'est pas entièrement satisfaisante, car elle détruit les photons. Comment peut-on compter des photons sans les détruire?

Une solution est de faire se réfléchir les photons sur un miroir et de mesurer le recul du miroir. Cela peut sembler presque incroyable, mais de nos jours cet effet devient mesurable même pour des petits nombres de photons. Par exemple, l'effet doit être pris en compte dans le cas des miroirs laser utilisés dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, dont la position doit être mesurée avec une grande précision.

Vol. II, page 181

Une autre façon de compter les photons sans les détruire est d'utiliser des cavités laser spéciales de haute qualité. Il est possible de compter les photons en mesurant l'effet qu'ils

* «Donc, finalement, ils existent.» Max Planck, durant ses dernières années, fit cette remarque après être resté debout, silencieux, pendant un long moment devant un instrument qui comptait des photons individuels en produisant un clic chaque fois qu'il en détectait un. Durant une grande partie de sa vie, Planck était resté sceptique envers le concept du photon, bien que ses propres expériences et conclusions aient été le point de départ de son introduction.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

ont sur des atomes placés astucieusement à l'intérieur d'une telle cavité.

Autrement dit, il est donc possible de mesurer l'intensité lumineuse sans l'absorber. Ces expériences font apparaître un problème important: même les meilleurs faisceaux lumineux, provenant des lasers les plus sophistiqués, ont des intensités qui *fluctuent*. Il n'y a *pas* de faisceaux stationnaires. Ceci n'est pas une surprise: si un faisceau lumineux ne fluctuait *pas*, deux observations successives conduiraient à une valeur nulle de l'action. Cependant, il y a une action minimale dans la nature, à savoir $\hbar$. Donc, dans la nature, tout faisceau, ainsi que tout écoulement, *doit* fluctuer. Mais il y a plus.

Un faisceau lumineux est décrit, dans sa coupe transversale, par son intensité et sa phase. Le changement (l'action) qui se produit alors qu'un faisceau se propage, est donnée par le produit entre l'intensité et la phase. Les expériences confirment la déduction évidente suivante: l'intensité et la phase d'un faisceau se comportent comme la quantité de mouvement et la position d'une particule, en ce sens qu'elles obéissent à une relation d'indétermination. Vous pouvez la déduire vous-même, de la même façon que nous avons déduit les relations d'Heisenberg. En utilisant comme intensité caractéristique $I = E/\omega$ (l'énergie du faisceau divisée par sa pulsation) et en nommant la phase φ, on obtient*

$$\Delta I \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{12}$$

D'une façon équivalente, le produit d'indétermination pour le nombre moyen de photons $n = I/\hbar = E/\hbar\omega$ et pour la phase φ obéit à

$$\Delta n \, \Delta\varphi \geqslant \frac{1}{2} \,. \tag{13}$$

Pour de la lumière émise par une lampe ordinaire, que l'on appelle de la *lumière thermique*, le produit d'indétermination à gauche de l'inégalité ci-dessus est un grand nombre. De la même manière, le produit d'indétermination de l'action (12) est un grand multiple du quantum d'action.

Pour les faisceaux laser, c.-à-d. les faisceaux de *lumière cohérente*,** le produit d'indétermination est proche de 1/2. Une illustration de lumière cohérente est donnée sur la Figure 22.

Il est aujourd'hui possible de produire de la lumière pour laquelle le produit des deux indéterminations de l'équation (13) est proche de 1/2, mais dont les deux valeurs *dif-*

* On suppose un grand nombre de photons dans cette expression. Ceci est évident car $\Delta\varphi$ ne peut pas croître au-delà de toutes les limites. Plus précisément, il ne peut pas croître au-delà de 2π. Les relations exactes sont

$$\Delta I \, \Delta \cos\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |\langle \sin\varphi \rangle|$$
$$\Delta I \, \Delta \sin\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |\langle \cos\varphi \rangle| \tag{11}$$

où $\langle x \rangle$ représente l'espérance mathématique de l'observable x.

** De la lumière cohérente est de la lumière pour laquelle la distribution de probabilité du nombre de photons suit une loi de Poisson. En particulier, la variance est égale au nombre moyen de photons. La meilleure façon de décrire la lumière cohérente est de la considérer comme étant composée de photons se trouvant dans des états quantiques cohérents. Un tel *état cohérent* (canonique), ou encore *état de Glauber*, est officiellement un état pour lequel $\Delta\varphi \to 1/n$ et $\Delta n \to n$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

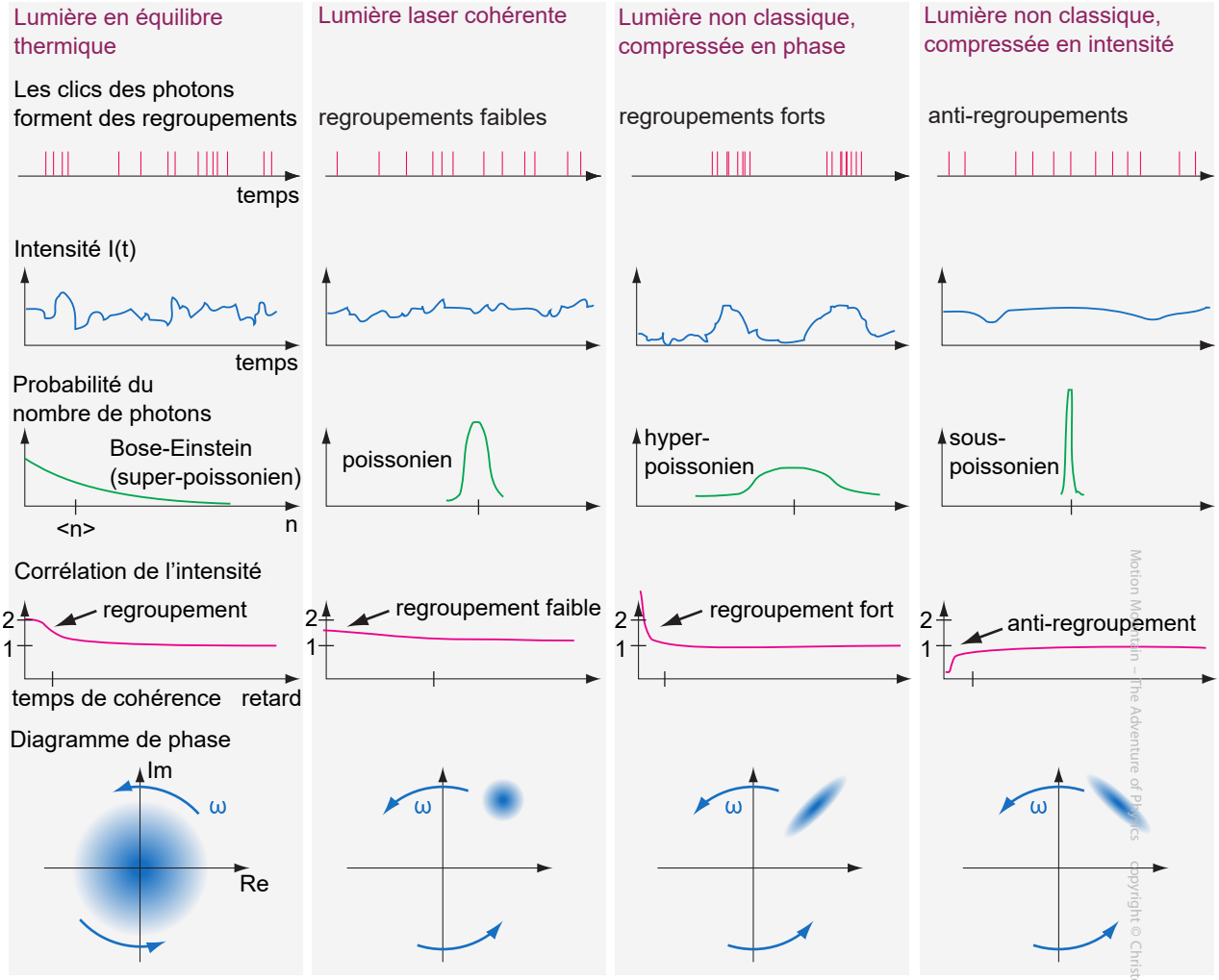


FIGURE 21 Quatre types de lumière et les propriétés de leurs photons: de la lumière thermique, de la lumière laser et deux types extrêmes de lumière non-classique, compressée.

fèrent (dans les unités de ce que l'on appelle l'*espace!de phases*, qui est illustré sur la Ref. 19 Figure 21). Une telle lumière est qualifiée de *non-classique* ou *compressée*. La distribution statistique des photons est soit hyper-poissonienne, soit sous-poissonienne. De tels faisceaux lumineux nécessitent des installations de laboratoire compliquées pour leur production, et ils sont utilisés dans de nombreuse applications de recherche modernes. La lumière non-classique doit être manipulée avec beaucoup de soin, car la moindre perturbation va la faire se retransformer en lumière cohérente ordinaire (voire même en lumière thermique), pour laquelle les statistiques de Poisson (ou même de Bose-Einstein) redeviennent valides. Une vue d'ensemble des principaux types de faisceaux lumineux est donnée par la Figure 21, avec les comportements de leur intensité et de leur phase. (Plusieurs des propriétés présentées sur la figure sont définies seulement pour une seule cellule de l'espace des phases.)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

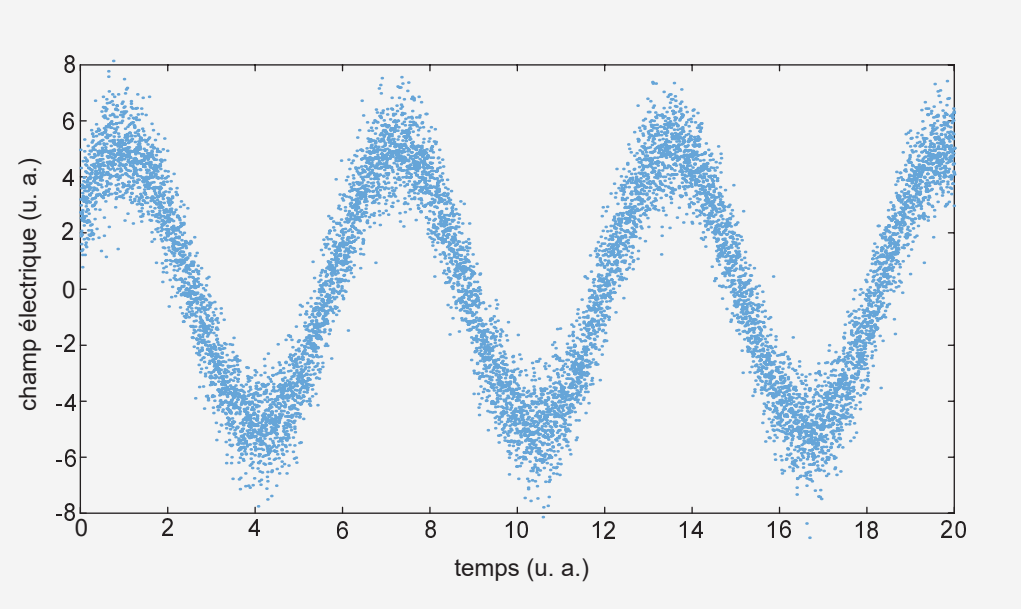


FIGURE 22 Un moyen simple pour illustrer l'indétermination de l'intensité et de la phase d'un faisceau de lumière: le champ électrique que l'on mesure pour une onde électromagnétique cohérente et de faible intensité (consistant environ d'une douzaine de photons). L'onde sinusoïdale floue correspond au diagramme de phase du bas de la seconde colonne de la vue d'ensemble précédente. Pour un grand nombre de photons, l'amplitude relative du bruit de fond est négligeable. (© Rüdiger Paschotta)

Une situation extrême de lumière non-classique est la *lumière compressée en phase*. Puisqu'un faisceau de lumière compressée en phase a une phase (presque) déterminée, le nombre de photons d'un tel faisceau fluctue entre zéro et (presque) l'infinie. Autrement dit, pour pouvoir produire une lumière laser cohérente qui soit aussi proche que possible d'une onde sinusoïdale pure, il nous faut accepter que le nombre de photons soit aussi indéterminé que possible. Un tel faisceau a une fluctuation de phase extrêmement réduite, ce qui permet une grande précision en interférométrie. Le bruit de fond parasite de la phase est aussi faible que possible.

L'autre situation extrême de lumière non-classique est un faisceau comportant un nombre donné, fixe, de photons, et donc ayant une indétermination de phase extrêmement élevée. Pour un tel faisceau de *lumière compressée en amplitude*, la phase fluctue de façon erratique.* Ce type de lumière compressée, non-classique, est idéale pour des mesures d'intensité précises car il fournit le plus petit bruit de fond disponible pour mesurer l'intensité. Ce genre de lumière met en évidence des *anti-regroupements* de photons. Pour vous donner un meilleur aperçu, esquissez le graphe correspondant à la Figure 22 pour de la lumière compressée en phase et pour de la lumière compressée en amplitude).

Défi 36 e

En revanche, la *lumière cohérente* qui est émise par les pointeurs laser, ainsi que tout autre laser, se situent entre les deux types extrêmes de lumière compressée: les indéterminations sur la phase et sur le nombre de photons sont du même ordre de grandeur.

* Les états quantiques les plus appropriés pour décrire une telle lumière s'appellent les *états de nombres*, ou encore *états de Fock*. Ces états sont stationnaires, et donc états propres de l'Hamiltonien, et ils contiennent un nombre fixe de photons.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les observations concernant la lumière thermique, la lumière laser cohérente et la lumière non-classique mettent en avant une propriété importante de la nature: le nombre de photons dans un faisceau lumineux n'est pas une quantité bien définie. En général, il est indéterminé, et il *fluctue*. Contrairement aux pierres, il n'est pas possible de compter les photons avec précision (tant qu'ils se propagent et ne sont pas absorbés). Lorsqu'ils sont en vol, il n'est possible de déterminer qu'un nombre approximatif, moyen, de photons, dans les limites définies par l'indétermination. Est-il correct d'affirmer que le nombre de photons au départ du faisceau n'est pas nécessairement le même qu'à la fin du faisceau? Défi 37 pe

Les fluctuations sur le nombre de photons sont de la plus grande importance pour les fréquences optiques. Pour les fréquences radio, les fluctuations du nombre de photons sont généralement négligeables du fait de la faible énergie des photons ainsi que des nombres généralement élevés de photons impliqués. Inversement, aux énergies des rayons gamma, les effets ondulatoires ne jouent qu'un petit rôle. Par exemple, nous avons vu que dans l'espace intergalactique, distant et sombre, loin de toute étoile, il y avait environ 400 photons par centimètre cube, et qu'ils formaient le rayonnement de fond diffus cosmologique. Cette densité du nombre de photons, tout comme le nombre de photons dans un faisceau lumineux, a aussi une indétermination lors des mesures. Pouvez-vous l'estimer? Défi 38 e

En bref, contrairement aux cailloux, *bien que les photons puissent être comptés, leur nombre n'est pas fixe*. Et ceci n'est pas la seule différence entre les photons et les cailloux.

La position des photons

Où se trouve un photon lorsqu'il se déplace au sein d'un faisceau lumineux? La théorie quantique nous donne une réponse simple: à aucun endroit particulier. Ceci est démontré d'une façon des plus spectaculaire à l'aide d'expériences utilisant des interféromètres, tel que l'interféromètre élémentaire présenté sur la Figure 23. Les interféromètres montrent que même un faisceau composé d'un *seul* photon peut être divisé, forcé à suivre deux chemins différents, pour ensuite être recombiné. L'interférence qui en résulte montre qu'il n'est pas possible de dire si le photon individuel a pris l'un ou l'autre des deux chemins. Si un des deux chemins est obstrué, le motif sur l'écran change. Autrement dit, d'une façon ou d'une autre, le photon a dû passer par les deux chemins en même temps. Les photons ne peuvent pas être localisés, ils n'ont pas de position.*

Nous en arrivons à la concluons que les impulsions de lumière macroscopiques ont des chemins, mais que les photons individuels qui les composent n'en ont pas. Les photons n'ont ni chemin, ni position. Seuls les grands nombres de photons peuvent avoir des chemins et des positions, et encore, seulement de façon approximative.

L'impossibilité de localiser les photons peut être quantifiée. Les interférences montrent qu'il est impossible de localiser les photons dans la direction *transversale* par rapport au déplacement. Il semblerait qu'il puisse être moins difficile de les localiser *le long de* la direction de déplacement, lorsqu'ils font partie d'une impulsion lumineuse, mais ceci est une erreur. Le quantum d'action implique que l'indétermination

* Il n'est pas possible de contourner cette conclusion en disant que le photon est *divisé* par le séparateur de faisceau: si on place un détecteur sur chacun des deux chemins, on trouve qu'ils ne détectent jamais de photon en même temps. Les photons ne peuvent pas être divisés.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

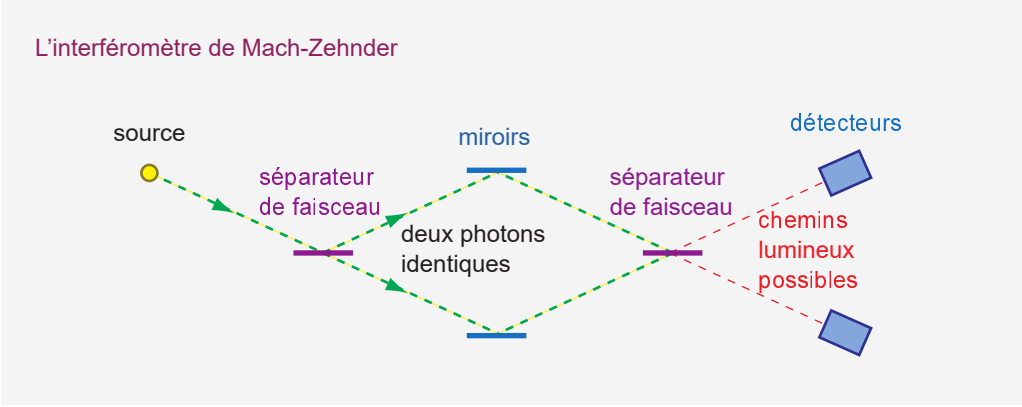


FIGURE 23 L'interféromètre de Mach-Zehnder ainsi qu'une réalisation pratique, d'une taille d'environ 0,5 m. (© Félix Dieu et Gaël Osowiecki)

sur la position longitudinale est donnée au moins par la longueur d'onde de la lumière. Pouvez-vous le confirmer? Il se trouve que les photons ne peuvent être localisés que dans la limite d'une *longueur de cohérence*. En fait, dans le cas général, la longueur de cohérence transversale diffère de la longueur de cohérence longitudinale. La longueur de cohérence longitudinale (divisée par c) est également appelée la cohérence temporelle, ou plus simplement le *temps de cohérence*, qui est également indiqué sur la Figure 21. L'impossibilité de localiser les photons est une conséquence du quantum d'action. Par exemple, la longueur de cohérence transversale est due à l'indétermination de la quantité de mouvement transversale. Les valeurs de l'action, pour des chemins passant par des points séparés par une distance plus petite qu'une longueur de cohérence, diffèrent de

Défi 39 f
Page 54

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

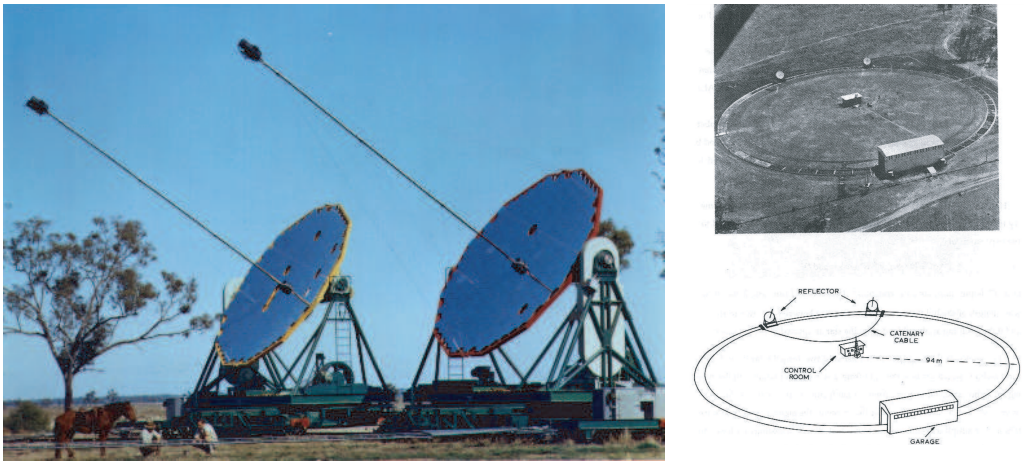


FIGURE 24 La configuration expérimentale originale avec laquelle Hanbury Brown et Twiss ont mesuré les diamètres des étoiles à Narrabri en Australie. La distance entre les deux collecteurs de lumière pouvait être modifiée en les déplaçant le long de rails. Les détecteurs de lumière se trouvent au bout des perches. Chacun d'eux, comme ils l'ont écrit eux-mêmes, «recueillait de la lumière comme de l'eau dans un saut.» (© John Davis)

moins d'un quantum d'action $\hbar$. Chaque fois que l'on détecte un photon quelque part, par exemple lors d'une absorption, il n'est *pas possible* de fournir une détermination *précise* de sa direction ou de son origine. Cependant, dans des cas spéciaux, il peut se trouver qu'il y ait une forte probabilité pour une direction particulière ou pour une source particulière.

L'absence de localisation signifie que les photons ne *peuvent pas* être simplement visualisés comme des trains de petites ondes. Par exemple, il est possible d'augmenter la longueur de cohérence en faisant passer de la lumière par un filtre étroit. Les photons sont réellement des entités qu'il n'est *pas possible de localiser*, spécifiques au monde quantique. Les photons ne sont ni des petites pierres, ni des petits paquets d'onde. En revanche, le «chemin lumineux», la «position d'une impulsion lumineuse» et la «cohérence» sont des propriétés d'un ensemble de photons, mais ne s'appliquent *pas* à un photon individuel.

Chaque fois que des photons peuvent être *presque* localisés le long de leur direction de propagation, comme c'est le cas pour la lumière cohérente, on peut se demander comment les photons s'alignent, les uns à la suite des autres, dans un faisceau lumineux. Il est vrai que l'on vient de voir que cela n'avait aucun sens de parler de leur position *précise*. Mais est-ce que les photons, dans un faisceau parfait, arrivent à des intervalles presque réguliers?

Ref. 20 À la grande honte des physiciens, l'étude de la corrélation des photons a été initiée par deux astronomes, Robert Hanbury Brown et Richard Twiss, en 1956, et a rencontré plusieurs années d'incrédulité. Ils ont fait varier la distance transversale entre les deux détecteurs que l'on peut voir sur la Figure 24 (de quelques mètres à 188 mètres) et ils ont mesuré les corrélations en intensité entre les deux. Hanbury Brown et Twiss ont alors trouvé que les fluctuations en intensité à l'intérieur du volume de cohérence étaient corrélées. Donc, les photons eux-mêmes sont corrélés. Avec cette expérience, ils ont pu me-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

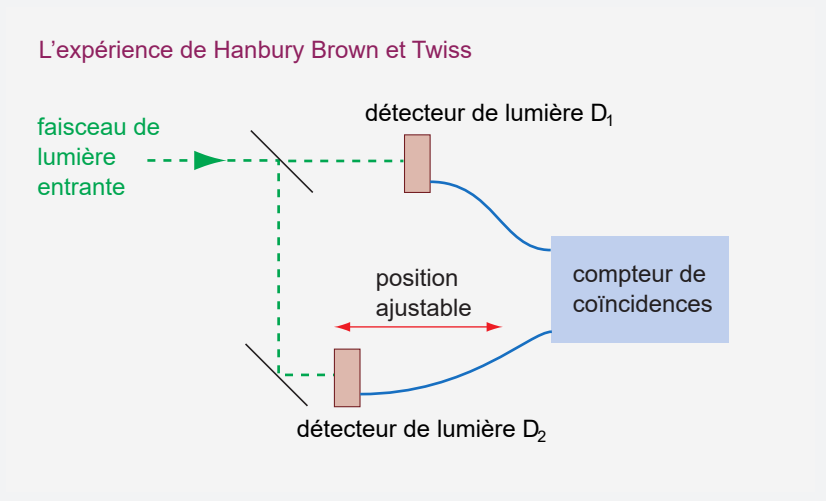


FIGURE 25 Comment mesurer les statistiques des photons avec un corrélateur d'intensité électronique (compteur de coïncidence). La variation est mesurée en faisant varier la position d'un détecteur.

surer le diamètre de nombreuses étoiles lointaines.

Inspirés par le succès de Hanbury Brown et Twiss, des chercheurs ont développé une méthode simple pour mesurer la probabilité pour qu'un second photon dans un faisceau lumineux arrive à un certain temps donné après le premier. Ils ont simplement divisé le faisceau, mis un détecteur sur la première des deux branches et ont fait varier la position du second détecteur sur l'autre branche. L'installation est représentée sur la Figure 25. Cette expérience est appelée aujourd'hui *l'expérience de Hanbury Brown et Twiss*. On trouve que, pour de la lumière cohérente et dans les limites du volume de cohérence, les clics des deux compteurs (et donc les photons eux-mêmes) sont *corrélés*. Pour être plus précis, de telles expériences montrent que chaque fois que le premier photon est reçu, le second photon a plus de chance d'être reçu juste après. Donc, les photons des faisceaux lumineux sont *regroupés*. Le regroupement est l'un des nombreux résultats qui montrent que les photons sont des quantons, qu'ils sont en effet nécessaires pour décrire la lumière, et que ce sont des entités qu'il n'est pas possible de localiser. Comme nous allons le voir ci-dessous, les résultats montent également que les photons sont des bosons.

Page 70

Chaque faisceau lumineux a une limite de temps maximale pour le regroupement: le *temps de cohérence*. Pour des durées plus longues que le temps de cohérence, la probabilité de regroupement est faible et indépendante de l'intervalle de temps, comme le montre la Figure 25. Le temps de cohérence caractérise chaque faisceau lumineux. En fait, il est souvent plus facile de penser en termes de *longueur de cohérence* d'un faisceau lumineux. Pour de la lumière thermique, la longueur de cohérence est seulement de quelques micromètres (un petit multiple de la longueur d'onde). Les longueurs de cohérence les plus grandes, de plus de 300 000 km, sont obtenues avec des lasers de recherche qui ont une bande passante laser extrêmement étroite de seulement 1 Hz. Il est intéressant de remarquer que de la lumière cohérente peut même être trouvée dans la nature: plusieurs étoiles spéciales qui en émettent ont été découvertes.

Ref. 21

Bien que l'intensité d'un bon faisceau laser soit presque constante, les photons n'arrivent pas à intervalles réguliers. Même la meilleure lumière laser produit des regroupements, mais avec une statistique différente et à un moindre degré que dans le cas de la

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

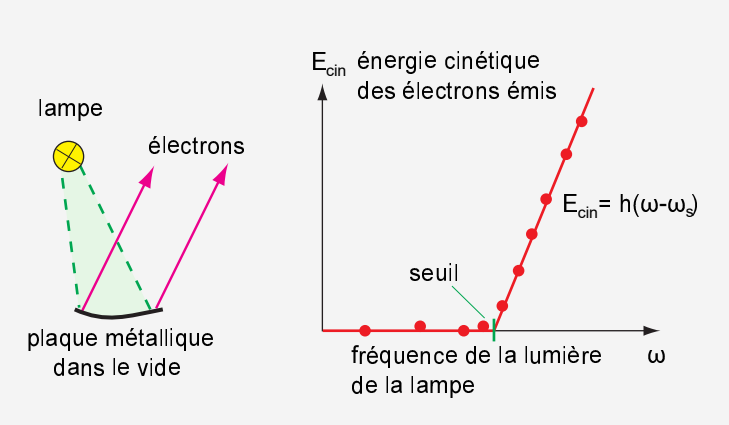


FIGURE 26 L'énergie cinétique des électrons émis par effet photoélectrique.

Page 54 lumière d'une lampe, comme l'illustre la Figure 21. La lumière dont les photons arrivent à intervalles réguliers, et donc produisant ce que l'on nomme des *anti-regroupements (de photons)*, est, de toute évidence, non-classique dans le sens défini ci-dessus. Une telle lumière ne peut être produite que par des montages expérimentaux spéciaux. Des exemples extrêmes de ce phénomène sont actuellement en cours d'investigation par plusieurs groupes de recherche, dont le but est de fabriquer des sources de lumière qui n'émettraient qu'un seul photon à la fois, à des intervalles de temps réguliers, et de façon la plus fiable possible. En bref, on peut affirmer que la statistique précise des photons dans un faisceau lumineux dépend du mécanisme de la source de lumière.

Pour résumer, les expériences nous obligent à conclure que la lumière est constituée de photons, mais aussi que les photons ne peuvent pas être localisés au sein des faisceaux lumineux. En général, parler de la position d'un photon n'a pas de sens. L'idée n'a de sens que dans certaines situations spéciales, et alors seulement de façon approximative et sous la forme d'une moyenne statistique.

Les photons sont-ils nécessaires?

À la lumière des résultats découverts jusqu'à présent, la réponse à la question ci-dessus est évidente. Mais le problème est délicat. Dans les manuels, l'*effet photoélectrique* est souvent cité comme étant la première et la plus évidente preuve expérimentale de l'existence des photons. En 1887, Heinrich Hertz avait observé que pour certains métaux, comme le lithium ou le césium, de la lumière ultraviolette incidente conduisait à charger électriquement le métal. Plus tard, d'autres études du même effet ont montré que la lumière produisait l'émission d'électrons, et que l'énergie des électrons éjectés ne dépendait pas de l'intensité de la lumière, mais seulement de la différence entre sa pulsation multipliée par $\hbar$ et un seuil d'énergie dépendant du matériau. La Figure 26 résume l'expérience et les résultats de mesures.

En physique classique, l'effet photoélectrique est difficile à expliquer. Mais en 1905, Ref. 22 Albert Einstein expliqua les résultats des mesures à partir de l'hypothèse que la lumière était constituée de photons d'énergie $E = \hbar\omega$. Il imagina que cette énergie était utilisée en partie pour amener l'électron au-dessus de l'énergie de seuil et en partie pour lui fournir

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de l'énergie cinétique. Un plus grand nombre de photons conduit seulement à un plus grand nombre d'électrons, mais pas à des électrons plus rapides. En 1921, Einstein reçu le prix Nobel pour l'explication de l'effet photoélectrique. Mais Einstein était un *génie*: il avait déduit un résultat correct en utilisant un raisonnement quelque peu incorrect. La (petite) erreur était d'avoir supposé qu'un faisceau de lumière classique et continu aurait produit un effet différent. En fait, il est facile de voir qu'un champ électromagnétique classique et continu, qui interagit avec de la matière discrète, faite d'atomes discrets, eux-mêmes composés d'électrons discrets, conduirait exactement au même résultat, pour autant que l'on décrive le mouvement des électrons avec la théorie quantique. Plusieurs
Ref. 23 chercheurs l'ont confirmé au début du XXe siècle. L'effet photoélectrique en lui-même n'implique donc *pas* l'existence des photons.

Il est vrai que de nombreux chercheurs par le passé n'étaient pas convaincus que l'effet photoélectrique démontrait l'existence des photons. Historiquement, l'argument le plus important pour la *nécessité* des quanta de lumière a été donnée par Henri Poincaré. En 1911 et 1912, âgé de 57 ans, et seulement quelques mois avant sa mort, il publia deux articles influents prouvant que la loi du rayonnement du corps noir (pour laquelle Max
Ref. 24 Planck avait découvert le quantum d'action) *requérait* l'existence des photons. Il démontra également que la quantité de rayonnement émise par un corps chaud n'était *finie* qu'à cause de la nature *quantique* des processus qui conduisaient à l'émission de la lumière. Une description de ces processus en termes d'électrodynamique classique conduirait à des quantités (presque) *infinies* d'énergie rayonnée. Les deux articles influents de Poincaré avaient convaincu la plupart des physiciens qu'il était devenu nécessaire d'étudier les phénomènes quantiques avec plus de détails. Poincaré ne connaissait pas l'action limite $S \geqslant \hbar$. Pourtant, son argument était basé sur l'observation qu'une lumière de fréquence donnée avait une intensité minimale, à savoir, le photon individuel. Un tel faisceau ne comportant qu'un seul photon peut être divisé en deux faisceaux, par exemple en utilisant un miroir semi-réfléchissant. Pourtant, pris dans leur ensemble, ces deux faisceaux ne contiennent jamais plus d'un seul photon.

Une autre expérience intéressante montrant la nécessité des photons est l'observation
Ref. 25 de «molécules de photons». En 1995, Jacobson et al. ont prédit qu'il devait être possible d'observer la longueur d'onde de de Broglie d'un *paquet* de photons. Selon la théorie quantique, la longueur d'onde du paquet est donnée par la longueur d'onde d'un photon unique divisée par le nombre de photons dans le paquet. L'équipe de recherche soutenait que la longueur d'onde du paquet pourrait être observée si un tel paquet pouvait être divisé, puis recombiné sans détruire sa cohésion interne. En 1999, cet effet fut enfin observé par de Pádua et son équipe de recherche au Brésil. Ils ont utilisé un dispositif minutieux, composé d'un cristal non-linéaire pour créer ce qu'ils appelaient un *biphoton*, et ils ont observé ses propriétés d'interférences, trouvant une réduction de la longueur d'onde effective par un facteur 2, tel que prédit. Depuis, des paquets de trois, voire quatre
Ref. 26 photons intriqués ont été créés et observés.

Un autre argument en faveur de la nécessité des photons est, comme nous l'avons
Page 48 mentionné plus haut, le recul des atomes lorsqu'ils émettent de la lumière. La meilleure façon d'expliquer le recul mesuré dans ces cas est en considérant l'émission d'un photon dans une direction particulière, ce qui n'est pas le cas de l'électrodynamique classique qui prédit l'émission d'une onde sphérique, sans préférence de direction.

De toute évidence, l'observation de la *lumière non-classique*, que l'on appelle aussi de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

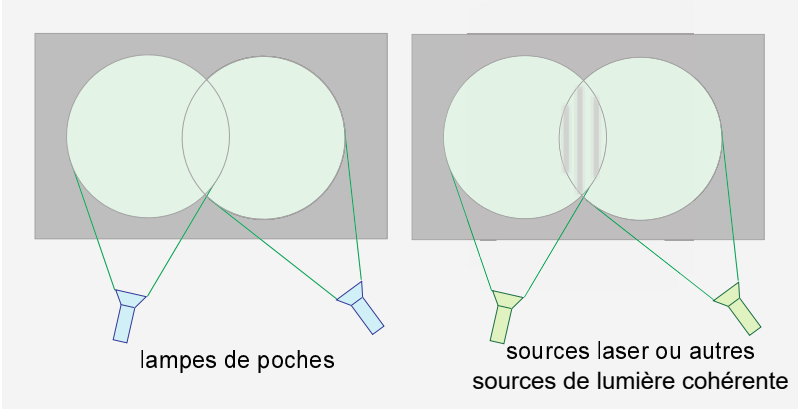


FIGURE 27 Deux situations pour lesquelles de la lumière croise de la lumière: des sources de lumière différentes produisent des résultats différents.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Page 54 la *lumière compressée*, conforte également l'existence des photons, car la lumière compressée prouve que les photons sont bien un aspect *intrinsèque* de la lumière, nécessaires même lorsque les interactions avec la matière ne jouent aucun rôle. Ceci est également vrai pour l'effet Hanbury Brown et Twiss.

Ref. 27

Finalement, la désintégration spontanée des états excités d'un atome nécessite aussi l'existence des photons. Ceci ne peut être expliqué par une description continue de la lumière.

En résumé, le concept du photon est donc bien nécessaire pour une description précise de la lumière. Mais les détails sont souvent subtils, car les propriétés des photons sont inhabituelles et demandent un changement de nos habitudes de pensée. Pour éviter ces problèmes, la plupart des manuels arrêtent de parler des photons après avoir décrit l'effet photoélectrique. C'est dommage, car ce n'est qu'à partir de là que les choses commencent à être intéressantes. Méditez sur ce qui suit. De toute évidence, tous les champs électromagnétiques sont constitués de photons. Aujourd'hui, les photons peuvent être comptés lorsqu'il s'agit de rayons gamma, de rayons X, de lumière ultraviolette, de lumière visible et de lumière infrarouge. Cependant, pour des fréquences plus faibles, telles que les ondes radio, les photons n'ont toujours pas été détectés. Pouvez-vous imaginer ce qui serait nécessaire pour permettre de compter les photons émis depuis une station radio? Ce problème nous conduit directement à la question la plus importante de toutes:

Défi 40 e

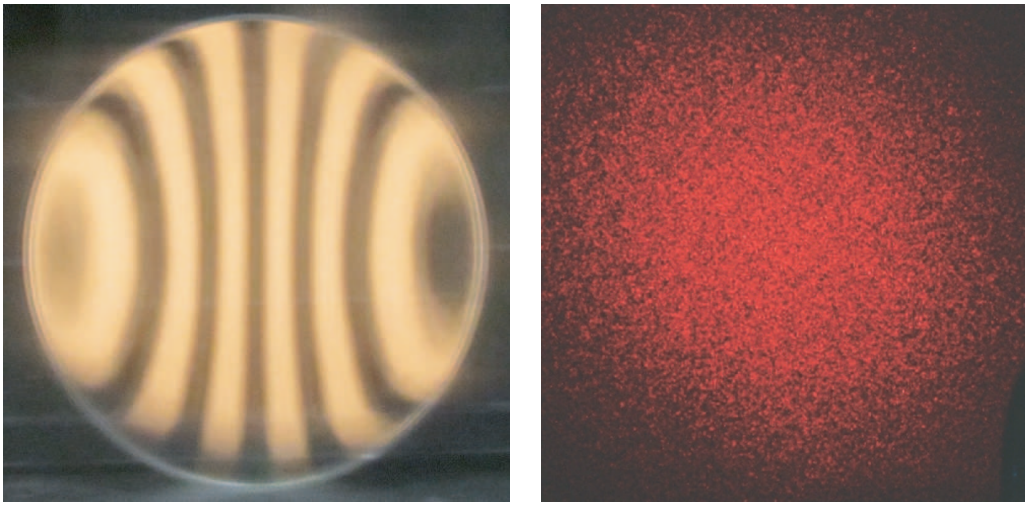


FIGURE 28 Exemples de figures d'interférence qui apparaissent lorsque des faisceaux de lumière cohérente se croisent: l'interférence produite par un miroir de télescope parabolique artisanal de 27 cm de diamètre et une figure de granularité laser sur une surface rugueuse. (© Mel Bartels, Epzcaw)

Les interférences: comment une onde peut-elle être constituée de particules?

> Die ganzen fünfzig Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort auf die Frage 'Was sind Lichtquanten?' nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump er wisse es, aber er täuscht sich.
>
> Albert Einstein, 1951 *

Si une onde lumineuse est constituée de particule, il doit être possible d'expliquer chacune des propriétés des ondes en termes de photons. Les expériences mentionnées ci-dessus nous laisse déjà entendre que ceci n'est possible que parce que les photons sont des particules *quantiques*. Essayons d'explorer plus en détails cette question.

La lumière peut *croiser* un autre faisceau lumineux sans être perturbée, par exemple lorsque les faisceaux lumineux de deux lampes de poche continuent à éclairer derrière l'endroit où ils se croisent. Cette observation n'est pas difficile à expliquer à l'aide des photons: puisque les photons n'interagissent pas entre eux et qu'ils sont comme des points sans dimension, ils ne se percutent «jamais». En réalité, il *y a* une probabilité extrêmement faible pour qu'ils interagissent, comme nous le découvrirons plus tard, mais cet effet n'est pas observable dans la vie quotidienne.

Vol. V, page 130

Mais si deux faisceaux de lumière *cohérente* (c.-à-d. deux faisceaux lumineux de fréquence identique et en relation de phase constante) se croisent, on observe alternativement des régions brillantes et des régions sombres, que l'on appelle des *franges d'interférence*. L'expérience est schématisée sur la Figure 27. Des exemples de produc-

* «Cinquante années à me ruminer la conscience ne m'ont pas rapproché de la réponse à la question «Que sont les quanta de lumière?» De nos jours, tout goujat pense qu'il le sait, mais il a tort.» Einstein écrivit ceci quelques années avant sa mort dans une lettre à Michele Besso.

Ref. 28

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 29 En haut: figures d'interférence calculées (et indistinguables de celles que l'on observe dans des conditions idéales que l'on trouve dans les manuels scolaires), produites par deux fentes étroites et parallèles éclairées par de la lumière verte et par de la lumière blanche. En bas: deux faisceaux gaussiens interférant sous un certain angle. (© Dietrich Zawischa, Rüdiger Paschotta)

tions d'interférences réelles sont présentés sur la Figure 28 et la Figure 29. Comment ces franges d'interférence apparaissent-elles?* Comment se peut-il qu'aucun photon ne soit détecté dans les zones d'ombre? Nous connaissons déjà la seule réponse possible: la luminosité en un point donné correspond à la *probabilité* pour qu'un photon puisse y arriver. Les franges impliquent que

▷ Les photons se comportent comme des petites *flèches* qui se déplacent.

Une réflexion plus poussée conduit à la description suivante:

— La flèche est toujours perpendiculaire à la direction du déplacement.
— La direction de la flèche reste fixe dans l'espace lorsque les photons se déplacent.

* Si des lasers sont utilisés, les franges ne peuvent être observées que si les deux faisceaux sont issus d'un faisceau unique après qu'il ait été divisé, ou si on utilise deux lasers de haute précision, et chères. (Pourquoi?)

Défi 41 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

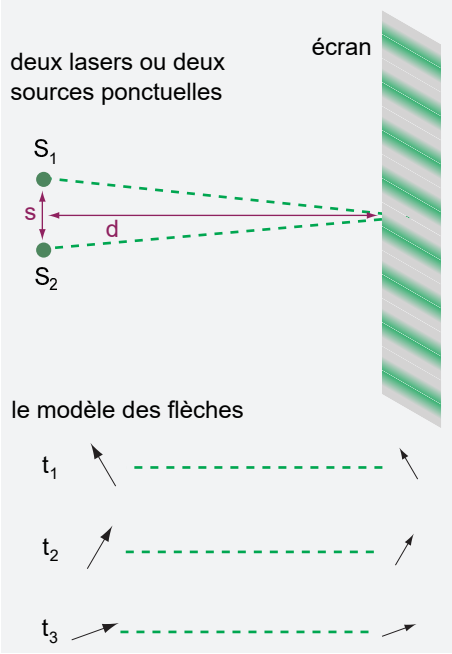


FIGURE 30 Les interférences et la description de la lumière à l'aide de flèches (à trois instants dans le temps).

— La longueur d'une flèche diminue comme le carré de la distance parcourue.
— *La probabilité pour qu'un photon arrive quelque part est donnée par le carré d'une flèche.*
— *La flèche finale est la somme de toutes les flèches qui arrivent en un point par tous les chemins possibles.*
— Les photons émis par des source monochromatiques sont émis avec des flèches de longueur constante et pointant dans la direction ωt. Autrement dit, de telles sources crachent des photons par une bouche *tournant sur elle-même*.
— Les photons émis par des sources incohérentes (par exemple des sources thermiques, telles que des lampes de poche) sont émis avec des flèches de longueur constante et pointant dans des directions *aléatoires*.

À l'aide de ce modèle simple,* nous pouvons expliquer le comportement ondulatoire de la lumière. En particulier, nous pouvons expliquer les franges d'interférence que l'on voit lors des expériences avec des lasers, comme le montre schématiquement la Figure 30. Vous pouvez vérifier que dans certaines régions, les deux flèches voyageant par chacune des deux fentes s'annulent *tout le temps*. Aucun photon n'est détecté dans ces régions: elles sont noires. Dans d'autre régions, les flèches s'additionnent toujours pour donner la valeur maximale. Ces régions sont toujours brillantes. Les régions entre les deux ont des niveaux intermédiaires de brillance. De toute évidence, dans le cas des lampes de poche courantes, que montre la partie gauche de la Figure 27, la luminosité dans la région

* Le modèle fournit une description correcte de la lumière, excepté qu'il néglige la polarisation. Pour ajouter la polarisation, il est nécessaire de combiner des flèches qui tournent dans les deux sens autour de la direction de déplacement.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

commune se comporte également comme on s'y attend: les moyennes s'additionnent simplement.

Bien évidemment, le modèle du photon implique qu'une figure d'interférence se construit lorsqu'un grand nombre d'impacts de photons individuels s'accumulent. En utilisant des faisceaux de faible intensité, il doit donc être possible de voir comment ces petites tâches s'amoncellent doucement pour former une figure d'interférence, en arrivant en plus grand nombre sur les régions brillantes et en évitant les régions sombres. Page 47 C'est en effet le cas, comme nous l'avons vu plus tôt. Toutes les expériences confirment cette description.

Autrement dit, une interférence est la superposition de champs de lumière cohérente ou, plus généralement, de champs électromagnétiques cohérents. Le comportement des photons des champs de lumière cohérente est spécifique et plus régulier que celui des champs de lumière incohérente. Nous explorerons les détails de la statistique des photons très bientôt.

En résumé, les photons sont des particules quantiques. Les particules quantiques peuvent produire des figures d'interférence (de même que tous les autres effets propres aux ondes) quand elles apparaissent en grands nombres, parce qu'elles sont décrites par une flèche dont le carré de la longueur fournit la probabilité de leur détection.

L'interférence d'un seul photon

Il est important de faire remarquer que l'interférence entre deux faisceaux lumineux n'est *pas* le résultat de deux photons distincts qui s'annuleraient ou bien qui s'ajouteraient. Une telle annulation contredirait la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. L'interférence est un effet qui s'applique à chaque photon séparément (tel qu'on l'a montré dans la section précédente) parce que chaque photon est dispersé sur l'ensemble du dispositif: chaque photon passe par tous les chemins possibles. Ref. 29 Comme Paul Dirac le soulignait:

▷ Chaque photon n'interfère qu'avec lui-même.

L'interférence d'un photon avec lui-même ne se produit que parce que les photons sont des quantons, et non pas des particules classiques.

L'affirmation de Dirac, bien souvent citée, conduit à un paradoxe célèbre: si un photon ne peut interférer qu'avec lui-même, comment deux faisceaux provenant de deux lasers différents peuvent-ils interférer entre eux? La réponse que fournit la physique quantique est simple, mais étrange: dans la région où les faisceaux interfèrent (comme mentionné Page 56 plus haut) il est impossible de savoir de quelle source un photon provient. Il n'est *pas possible* de dire de quelle source spécifique proviennent les photons qui se trouvent dans la région où les faisceaux se croisent. Les photons dans la région commune sont aussi des quantons, et ils n'interfèrent donc qu'avec eux-mêmes.

Une autre description de la situation est la suivante:

▷ Un photon n'interfère que dans son volume de cohérence. Et dans ce volume, il est impossible de distinguer les photons.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

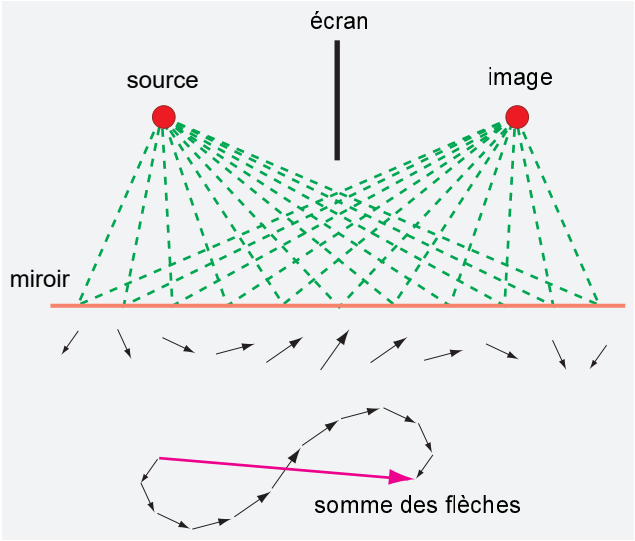


FIGURE 31 De la lumière réfléchie par un miroir, et les flèches correspondantes (à un instant donné).

Dans le volume de cohérence formé par les longueurs de cohérence longitudinale et transversale (ce que l'on appelle parfois une *cellule de l'espace des phases*) on ne peut pas vraiment dire que la lumière soit un écoulement de photons, parce qu'un écoulement ne peut pas y être défini. Malgré des affirmations régulières du contraire, l'énoncé
Page 74
de Dirac est correct, comme on le verra par la suite. C'est une conséquence étrange du quantum d'action.

La réflexion et la diffraction déduites des photons à flèches

Les ondes manifestent également de la *diffraction*. La diffraction est le changement de direction de propagation de la lumière, ou de n'importe quelle autre onde, proche des arêtes d'un obstacle. Pour comprendre ce phénomène dans le cas des photons, commençons par un simple miroir, et étudions d'abord la *réflexion*. Les photons (comme toutes les particules quantiques) se déplacent depuis une source vers un détecteur par *tous* les chemins possibles. Comme Richard Feynman,* qui découvrit cette explication, aimait à

* Richard («Dick») Phillips Feynman (New York City, 1918 – Los Angeles, 1988), physicien, fut l'un des fondateurs de l'électrodynamique quantique. Il découvrit aussi la reformulation de la théorie quantique dite de «l'intégrale de chemin», il apporta des contributions importantes à la théorie de l'interaction faible et à la gravité quantique, et il coécrivit un manuel célèbre *Le cours de physique de Feynman*, aujourd'hui disponible sur internet à www.feynmanlectures.info. Il était l'un de ces physiciens théoriciens qui fit carrière principalement en faisant des calculs avec les nombres complexes. Mais il fit marche arrière avec l'âge, et fut tout particulièrement couronné de succès avec son enseignement et ses livres de physique, qui valent tous la peine d'être lus. Il s'est consacré avec dévotion à la physique et au développement des connaissances, et il était collectionneur d'explications physiques surprenantes. Il aida à la construction de la bombe nucléaire, il écrivait des articles dans les bars pour gentlemen, il évitait de prendre des responsabilités professionnelles, et il était d'une arrogance célèbre ainsi qu'irrespectueux de l'autorité. Il a écrit plusieurs livres populaires sur les évènements de sa vie. Bien qu'il ait tenté toute sa vie de surpasser le génie de Wolfgang Pauli, il échoua dans cette aventure. Il partagea le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique en 1965.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

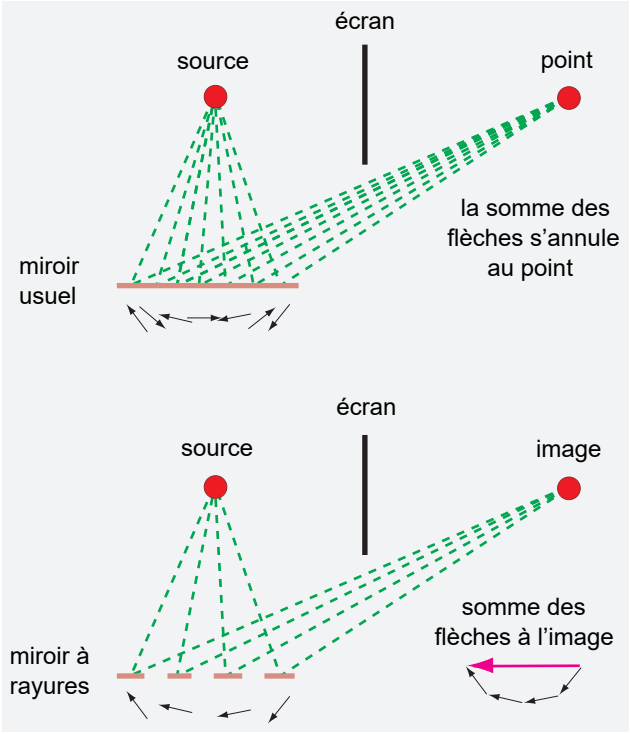


FIGURE 32 De la lumière réfléchie par un miroir mal positionné et par un réseau.

insister: le terme «tous» doit être pris au pied de la lettre. Ceci n'est pas vraiment important en ce qui concerne l'explication des interférences. Mais pour pouvoir comprendre un miroir, il faut inclure toutes les possibilités, aussi insensées qu'elles puissent paraître, comme le montre la Figure 31.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, une source lumineuse émet des flèches tournantes. Pour déterminer la probabilité pour que la lumière arrive à un certain point de l'image, il faut additionner toutes les flèches qui arrivent au même instant à cet emplacement. Pour chaque chemin, l'orientation de la flèche qui arrive à l'image est indiquée (uniquement pour faciliter la compréhension) en dessous du segment de miroir correspondant. L'angle et la longueur de la flèche qui arrive dépendent du chemin. Notez que la somme de toutes les flèches ne s'annule pas: de la lumière arrive en effet sur l'image. De plus, la contribution la plus importante provient des chemins les plus proches du milieu. Si on devait faire le même calcul pour un autre point de l'image, (presque) aucune lumière n'y parviendrait.

En bref, la règle qui dit que la réflexion se produit pour un angle réfléchit égal à l'angle initial est une approximation, qui découle du modèle des flèches de la lumière. En fait, un calcul détaillé, avec plus de flèches, montre que l'approximation est assez précise: les erreurs sont bien plus petites que la longueur d'onde de la lumière.

La preuve que la lumière prend bien tous ces chemins étranges est apportée par un miroir plus spécialisé. Comme le montre la Figure 32, on peut répéter l'expérience avec un miroir qui réfléchit seulement le long de certaines bandes. Dans ce cas, les bandes ont été soigneusement choisies pour que les longueurs correspondantes des chemins conduisent

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

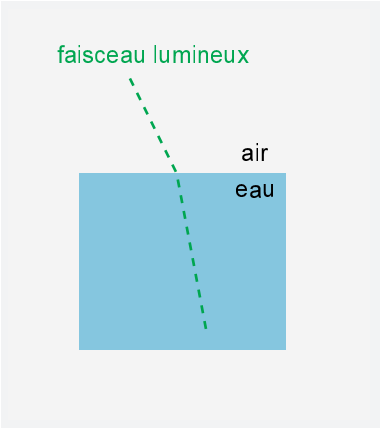


FIGURE 33 Si la lumière était faite de petites pierres, elles se déplaceraient plus vite dans l'eau.

à des flèches ayant un biais dans une direction, vers la gauche dans notre cas. La somme des flèches montre maintenant qu'un tel miroir spécialisé (appelé couramment un *réseau*) permet à la lumière de se réfléchir dans des directions inhabituelles. Il se trouve que ce comportement est standard pour les ondes: il s'appelle la *diffraction*. En bref, le modèle des flèches pour les photons nous permet de décrire cette propriété ondulatoire de la lumière, pour autant que les photons suivent ce schéma de probabilité un peu «farfelu». Mais que cela ne vous fâche pas! Comme nous l'avons dit plus haut, la théorie quantique est la théorie pour les dingues.

Vous voudriez peut-être vérifier que le modèle des flèches, avec les approximations qu'il produit en sommant sur tous les chemins possibles, garantit automatiquement que
Défi 42 e le quantum d'action est bien la plus petite action que l'on puisse observer.

La réfraction et la réflexion partielle déduites des photons à flèches

Toutes les ondes ont une *vitesse de propagation*. La vitesse de propagation dépend également du milieu dans lequel l'onde se propage. En conséquence, les ondes manifestent de la *réfraction* lorsqu'elles passent d'un milieu vers un autre, si ce dernier a une vitesse de propagation différente. Il est intéressant de noter que la vision particulaire naïve consistant à assimiler les photons à des petites pierres impliquerait que la lumière soit plus rapide dans des matériaux ayant un indice de réfraction élevé, que l'on qualifie de
Défi 43 f matériaux *denses* (voir Figure 33). Pouvez-vous le confirmer? Cependant, les expériences montrent que la lumière se déplace *lentement* dans les matériaux denses. La visualisation ondulatoire n'a aucune difficulté à expliquer cette observation. (Pouvez-vous le confir-
Défi 44 f mer?) Sur le plan historique, ceci a été l'un des arguments *contre* la théorie particulaire de la lumière. En revanche, le modèle des flèches pour la lumière, que l'on a présenté ci-dessus, est capable d'expliquer la réfraction correctement. Ce n'est pas difficile, essayez.
Défi 45 f

De même, les ondes se *réfléchissent partiellement* sur des matériaux tels que le verre. Ceci est l'une des propriétés des onde les plus difficile à expliquer à l'aide des photons. Mais c'est l'un des rares effets qui ne soit *pas* expliqué par une théorie ondulatoire clas-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sique de la lumière. En revanche, il *est* expliqué par le modèle des flèches, comme nous allons le découvrir. La réflexion partielle confirme les deux premières règles du modèle
Page 65 des flèches, et elle montre que les photons se comportent bien de façon *aléatoire*: certains sont réfléchis et d'autre ne le sont pas, sans aucun critère de sélection. La distinction est purement statistique. Nous reviendrons sur ce problème bientôt.

Des photons aux ondes

Dans les ondes, les champs *oscillent dans le temps et dans l'espace*. Un moyen pour montrer comment il est possible que les ondes puissent être constituées de particules, est de démontrer comment construire une onde sinusoïdale en utilisant un grand nombre de photons. Une onde sinusoïdale est un état cohérent de la lumière. La façon de les
Ref. 30 construire a été expliquée en détail par Roy Glauber. En fait, pour construire une onde sinusoïdale pure, nous avons besoin de la superposition d'un faisceau comportant un photon, d'un faisceau comportant deux photons, d'un faisceau comportant trois photons, etc. Ensemble, ils donnent une onde sinusoïdale parfaite. Comme on peut s'y attendre, son nombre de photons fluctue au plus haut degré possible.

En répétant le calcul pour des faisceaux non idéaux, nous trouvons que la relation d'indétermination pour l'énergie et le temps est respectée: tout faisceau émis possédera une certaine largeur spectrale. La lumière purement monochromatique n'existe pas. De façon similaire, aucun système qui émet une onde *au hasard* ne peut produire une onde monochromatique. Toutes les expériences confirment ce résultat.

De plus, les ondes peuvent être *polarisées*. Jusqu'à maintenant, nous avons ignoré cette propriété. Dans la représentation de la lumière par des photons, la polarisation est le résultat de la superposition rigoureuse de faisceaux de photons en rotation dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire. En effet, nous savons que la polarisation linéaire peut être vue comme étant le résultat de la superposition de lumières polarisées circulairement des deux signes, en utilisant la phase adéquate. Ce qui semblait être une curiosité en optique classique, apparaît comme une justification fondamentale pour la théorie quantique.

Finalement, les photons sont *indistinguables*. Lorsque deux photons de même couleur se croisent, il n'y a aucun moyen, après la rencontre, de les distinguer l'un de l'autre. Le quantum d'action rend cette distinction impossible. L'indistinguabilité des photons a une conséquence intéressante. Il est impossible de dire, parmi les photons qui sont émis, lequel correspond à un photon qui vient d'arriver. Autrement dit, il n'y a pas moyen de suivre le chemin d'un photon, comme on a l'habitude de le faire en suivant la trajectoire
Page 58 d'une boule de billard. Les photons sont en effet indistinguables. De plus, l'expérience de
Ref. 31 Hanbury Brown et Twiss implique que les photons sont des bosons. Nous découvrirons
Page 126 d'autres détails concernant l'indistinguabilité spécifique des bosons un peu plus loin.

Pour résumer, nous découvrons que les ondes lumineuses *peuvent* en effet être décrites comme étant constituées de particules. Cependant, ceci n'est correct qu'à la condition que les *photons*:

— ne soient pas dénombrables avec précision (jamais avec une précision meilleure que $\sqrt{N}$),
— ne soient pas localisables (jamais avec une précision meilleure que la longueur de cohérence),

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

— n'aient pas de taille, pas de charge et pas de masse (au repos),
— aient une phase qui augmente avec ωt, c.-à-d. avec le produit de la pulsation et du temps,
— transportent un spin de valeur 1,
— soient des bosons indistinguables (à l'intérieur d'un volume de cohérence) lorsqu'ils ont la même fréquence,
— puissent prendre n'importe quel chemin sans restriction (tant que les conditions aux limites le permettent),
— n'aient pas d'origine discernable, et
— aient une probabilité de détection donnée par le carré de la somme des amplitudes* de tous les chemins autorisés menant au point de détection.

Autrement dit, il est possible de décrire la lumière comme étant constituée de particules *seulement* si ces particules ont des propriétés spéciales, *quantiques*. Ces propriétés quantiques diffèrent de celles des particules de la vie quotidienne et permettent aux photons de se comporter comme des ondes chaque fois qu'ils sont présents en grands nombres.

La lumière peut-elle se déplacer plus vite que la lumière? – Les photons réels et les photons virtuels

Dans le vide, la lumière peut se déplacer plus vide que c, et également plus lentement que c. Le principe quantique nous fournit les détails. Tant que ce principe est respecté, la vitesse d'un petit flash de lumière peut être différente (bien que ce soit seulement d'une quantité minuscule) de la valeur «officielle». Pouvez-vous estimer la différence permise pour l'heure d'arrivée d'un flash lumineux venant de la nuit des temps?

Défi 46 pe

La description des photons à l'aide des flèches produit le même résultat. Si on prend en compte la possibilité folle que les photons puissent se déplacer avec n'importe quelle vitesse, on trouvera que toutes les vitesses très différentes de c s'annulent. La seule variation qui reste, traduite en termes de distance, est l'indétermination d'environ une longueur d'onde dans la direction longitudinale, que nous avons mentionnée plus haut.

Défi 47 pe

En bref, la lumière (les photons réels) peut en effet se déplacer plus vite que la lumière, mais seulement d'une quantité autorisée par le quantum d'action. Pour les situations de la vie quotidienne, c.-à-d. pour des grandes valeurs de l'action, tous les effets quantiques sont moyennés, y compris des vitesses de lumière et de photons différentes de c.

Il n'y a pas que la position d'un photon individuel qui puisse être indéfinie, il y a aussi son énergie. Par exemple, certains matériaux divisent les photons d'énergie $\hbar\omega$ en deux photons dont les deux énergies s'ajoutent pour donner l'énergie initiale. La mécanique quantique implique que le partitionnement de l'énergie n'est connu que lorsque l'énergie d'un des deux photons est mesurée. Ce n'est qu'à cet instant-là que l'énergie du second photon est connue. Avant la mesure, les deux photons ont des énergies indéfinies. Le processus d'établissement de l'énergie se produit *instantanément*, même si le second photon se trouve à une grande distance. Nous expliquerons plus loin les origines de cet effet ainsi que celles d'autres effets étranges similaires, *semblant* être plus rapides que la lumière. En fait, en dépit des apparences, ces observations ne font *pas* intervenir des transmissions d'énergie ou d'information plus rapides que la lumière.

Ref. 32

Page 173

Défi 48 e

* Cependant, l'amplitude d'un champ de photons ne peut et ne doit pas être identifiée à la fonction d'onde de n'importe quelle particule massique de spin 1.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Des conséquences encore plus bizarres du quantum d'action apparaissent lorsque l'on étudie les champs électriques *statiques*, tels que le champ qui entoure une sphère métallique chargée. De toute évidence, un tel champ doit aussi être composé de photons. Comment se déplacent-ils? Il se trouve que les champs électriques statiques sont composés de photons *virtuels*. Les photons virtuels sont des photons qui n'apparaissent pas comme des particules libres: ils n'apparaissent que pour un instant extrêmement court avant de disparaître à nouveau. Dans le cas d'un champ électrique statique, ils sont polarisés *longitudinalement*, et n'emportent pas d'énergie avec eux. Les photons virtuels, comme les autres particules virtuelles, sont des «ombres» de particules qui obéissent à

$$\Delta x \Delta p \leqslant \hbar/2 \,. \tag{14}$$

Plutôt que de satisfaire la relation d'indétermination habituelle, ils obéissent à la relation contraire, qui exprime leur très brève apparition. Malgré leur durée de vie intrinsèque très courte, et malgré l'impossibilité de les détecter directement, les particules virtuelles ont des effets importants. Nous les explorerons en détails très bientôt.

Page 219

En fait, le potentiel vecteur A autorise *quatre* polarisations, correspondant aux quatre coordonnées (t, x, y, z). Il se trouve que dans le cas des photons dont tout le monde parle couramment (les photons libres ou *réels*) les polarisations le long des directions t et z s'annulent, de sorte que l'on observe uniquement les polarisations le long de x et de y lors des expériences réelles.

Pour les photons liés (ou *virtuels*), la situation est différente. Les quatre polarisations sont possibles. En effet, les polarisations des photons virtuels le long de z et de t (qui n'apparaissent pas dans le cas des photons réels, c.-à-d. les photons libres) sont celles dont on peut dire qu'elles sont les briques permettant de construire les champs électriques et magnétiques *statiques*.

Autrement dit, les champs électriques et magnétiques statiques sont des écoulements continus de photons virtuels. Au contraire des photons réels, les photons virtuels peuvent avoir une masse, peuvent avoir des directions de spin qui ne pointe pas dans la direction de leur déplacement, et peuvent avoir des quantités de mouvement opposées à leur direction de déplacement. L'échange de photons virtuels conduit à l'*attraction* des corps ayant une charge électrique différente. En fait, les photons virtuels apparaissent *nécessairement* dans toute description des interactions électromagnétiques. Plus loin, nous discuterons de leurs effets plus en détails, y compris la fameuse attraction des corps neutres.

Vol. V, page 122

Nous avons déjà vu précédemment que les photons virtuels, par exemples ceux dont on a besoin pour décrire les collisions de charges, doivent être capable de se déplacer avec des vitesses supérieures à celle de la lumière. Cette description est nécessaire pour pouvoir garantir que la vitesse de la lumière reste une limite dans toutes les expériences.

Vol. II, page 72

Pour résumer, il peut être intéressant de noter que les photons virtuels, contrairement aux photons réels, ne sont pas limités par la vitesse de la lumière. Mais il est également équitable de dire que les photons virtuels se déplacent plus vite que la lumière uniquement dans un sens *formel*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L'INDÉTERMINATION DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

Nous avons vu que le quantum d'action impliquait une indétermination pour l'intensité lumineuse. Puisque la lumière est une onde électromagnétique, cette indétermination implique des limites similaires et distinctes pour les champs électriques et magnétiques en un point donné de l'espace. Cette conclusion fut établie pour la première fois en 1933 par Bohr et Rosenfeld. Ils commencèrent par les effets des champs sur une particule test de masse m et de charge q. Ces effets sont décrits par

Ref. 33

$$m\boldsymbol{a} = q\,(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{b})\ . \tag{15}$$

Puisqu'il est impossible de mesurer à la fois la quantité de mouvement et la position d'une particule, ils en ont déduit une indétermination pour le champ électrique donnée par

Défi 49 pe

$$\Delta E = \frac{\hbar}{q\,\Delta x\,t}\ , \tag{16}$$

où t est l'instant de la mesure et Δx est l'indétermination sur la position. Donc, chaque valeur d'un champ électrique, et de façon similaire d'un champ magnétique, possède une indétermination. À cet égard, l'état du champ électromagnétique se comporte comme l'état de la matière: tous les deux suivent une relation d'indétermination.

COMMENT L'ÉCHANGE DE PHOTONS VIRTUELS PEUT-IL CONDUIRE À UNE ATTRACTION?

Un échange de photons réels conduit toujours à du recul. Mais l'échange de photons *virtuels* peut conduire soit à une attraction, soit à une répulsion, selon les signes des deux charges considérées. Ceci vaut la peine d'y jeter un coup d'œil.

Nous commençons avec deux charges localisées et de même signe, se trouvant toutes les deux sur l'axe des x, et nous voulons déterminer la quantité de mouvement transférée depuis la charge se trouvant à droite vers la charge se trouvant à gauche, au moyen d'un photon virtuel.

En ce qui concerne le photon virtuel, la partie importante de son état *dans l'espace des quantités de mouvement* est sa partie imaginaire, qui, *si le photon virtuel est émis par une charge négative*, a un pic positif (en forme de fonction delta – encore appelée «distribution de Dirac» [N.d.T.]) pour la valeur négative de sa quantité de mouvement et un pic négatif pour la valeur positive de sa quantité de mouvement.

Lorsque le photon virtuel percute l'autre particule chargée, celle de gauche, il peut la pousser soit vers la gauche, soit vers la droite. L'amplitude de probabilité pour chaque processus est donnée par la charge de la particule, multipliée par la valeur de la quantité de mouvement du photon, multipliée par i, multipliée par le temps. Les deux amplitudes doivent être ajoutées.

Dans le cas où la seconde particule a la même charge que la première, l'effet de l'absorption du photon virtuel dans l'espace des quantités de mouvement est d'ajouter une fonction d'onde, qui était initialement antisymétrique et à valeurs positives sur l'axe positif, et qui est alors décalée vers la gauche, à une seconde fonction d'onde, qui était initialement l'opposée de la première, mais qui est alors décalée vers la droite. Le résultat

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de ce processus d'absorption d'un photon est une fonction dans l'espace des quantités de mouvement à valeurs réelles et antisymétrique, avec des valeurs positives pour les quantités de mouvement négatives et des valeurs négatives pour les quantités de mouvement positives.

Pour comprendre la répulsion, nous devons ajouter la fonction d'onde de ce processus (correspondant à un photon) à la fonction de la seconde particule (correspondant à zéro photon et donc inchangée), et ensuite élever la somme au carré. Cette fonction inchangée était positive dans le cas de charges identiques. Le processus d'élévation au carré de la somme conduit à une distribution de probabilité dans l'espace des quantités de mouvement dont le maximum se trouve à une valeur négative de la quantité de mouvement. Donc, la seconde particule a été *repoussée* de la première.

Si les charges avaient été de signes différents, le maximum de la somme se serait trouvé à une valeur positive de la quantité de mouvement, et la seconde particule aurait été *attirée* vers la première. En bref, le choix entre l'attraction et la répulsion est déterminé par l'interférence entre la fonction d'onde de l'absorption à un photon (plus précisément, de l'absorption à nombre impair de photons) et la fonction d'onde de l'absorption à zéro photon (plus précisément, de l'absorption à nombre pair de photons).

Deux photons peuvent-ils interférer?

Page 66 En 1930, Paul Dirac prononça l'affirmation célèbre déjà mentionnée plus tôt:

> ▷ Chaque photon n'interfère qu'avec lui-même. Des interférences ne se produisent jamais entre deux photons différents Ref. 29

Cette affirmation est souvent mal interprétée en laissant entendre que la lumière provenant de deux *sources* de photons séparées ne peut pas interférer. Malheureusement, Ref. 34 cette fausse interprétation s'est répandue sur une partie de la littérature. N'importe qui peut vérifier que cette affirmation est incorrecte à l'aide d'un poste radio: des signaux en provenance de deux stations radio distantes et émettant à la même fréquence produisent des variations périodiques d'amplitude, c.-à-d. des *interférences d'ondes*. (Ceci ne doit pas être confondu avec le phénomène plus commun d'*interférences radio*, qui, en général, sont simplement des superpositions d'intensités.) Les émetteurs radio sont des sources cohérentes de photons, et n'importe quel récepteur radio démontre que les signaux de deux sources différentes peuvent très bien interférer.

En 1949, l'interférence entre des champs émis par deux sources de photons différentes a été également démontrée avec des faisceaux de *micro-ondes*. Depuis les années 1950, de nombreuses expériences utilisant deux lasers, et même deux sources de lumière ther- Ref. 35 mique, ont produit des interférences lumineuses. Par exemple, en 1963, Magyar et Mandel ont utilisé deux lasers à rubis émettant des impulsions lumineuses et un appareil photo à obturateur rapide pour produire des franges d'interférence spatiales.

Cependant, tous ces résultats expérimentaux, faisant interférer deux sources, ne contredisent pas l'affirmation de Dirac. En effet, deux photons ne peuvent pas interférer pour plusieurs raisons.

— Les interférences résultent de la propagation d'ondes dans l'espace-temps. Les pho-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tons n'apparaissent que si la représentation en impulsion-énergie est utilisée, ce qui est principalement le cas lorsqu'il se produit des interactions avec la matière. La description de la propagation dans l'espace-temps et la représentation particulaire sont mutuellement exclusives (ce qui est un des aspects du principe de complémentarité). Pourquoi Dirac semble-t-il mélanger les deux dans son affirmation? Dirac emploie le terme «photon» dans un sens très général, comme étant un état quantifié du champ électromagnétique. Lorsque deux faisceaux cohérents se superposent, les entités quantifiées (les photons) ne peuvent pas être attribués à l'une ou l'autre des sources. Les interférences résultent de la superposition de deux états cohérents, et non pas de deux particules.

— Une interférence n'est possible que lorsque l'on *ne peut pas savoir* d'où provient le photon détecté. Dans une situation produisant des interférences, la description du champ par la mécanique quantique ne permet jamais d'attribuer les photons du champ superposé à l'une ou l'autre des sources. Autrement dit, s'il est possible de dire de quelle source provient un photon détecté, on *ne peut pas* observer d'interférence.

— Une interférence entre deux faisceaux cohérents nécessite une phase corrélée (fixe) entre les deux, c.-à-d. un nombre de particules indéterminé. Autrement dit, une interférence est possible si, et seulement si, le nombre de photons pour chacun des deux faisceaux est inconnu. Et le nombre de photons d'un faisceau est inconnu lorsque l'indétermination sur le nombre est du même ordre de grandeur que le nombre moyen.

L'affirmation de Dirac dépend donc de la définition du terme «photon». Une meilleure façon de l'exprimer serait de dire qu'une interférence se produit toujours entre deux histoires (indistingables) de l'état, mais jamais entre deux particules quantiques. Où encore, comme exprimé ci-dessus:

▷ Un photon n'interfère qu'à l'intérieur de son volume de cohérence, c.-à-d. au sein de sa propre cellule de l'espace des phases. En dehors, il n'y a pas d'interférence. Et à l'intérieur de ce volume (cette cellule) il est impossible de distinguer les photons, les états ou les histoires des états.

Le concept de «photon» reste profond, même aujourd'hui. La modélisation de la cohérence et de la lumière par des particules quantiques est restée fascinante jusqu'à ce jour. Pour résumer, on peut dire que *deux faisceaux électromagnétiques différents peuvent interférer, alors que deux photons différents ne le peuvent pas.*

Curiosités et défis amusants concernant les photons

Est-il possible d'expliquer la réfraction à l'aide des photons? Newton n'avait pas été capable de le faire, mais aujourd'hui, on le peut. Lors d'une réfraction par une surface horizontale, tel que le montre la Figure 34, la situation est invariante par translation le long de la direction horizontale. Donc, la composante de la quantité de mouvement le long de cette direction se conserve: $p_1 \sin\alpha_1 = p_2 \sin\alpha_2$. L'énergie du photon $E = E_1 = E_2$ est bien évidemment conservée. L'indice de réfraction n est défini en termes de quantité

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

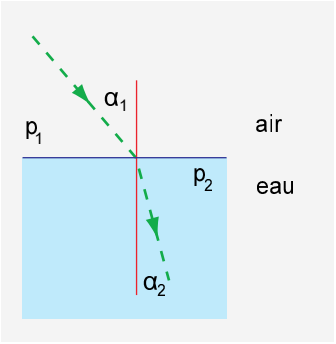


FIGURE 34 La réfraction et les photons.

de mouvement et d'énergie comme étant

$$n = \frac{cp}{E} \,. \tag{17}$$

Défi 50 f La «loi» de la réfraction s'en suit:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n \,. \tag{18}$$

Cette relation est connue depuis le Moyen Âge.

Il y a un problème important dans ce que l'on vient de dire. Dans un matériau, la vitesse d'un photon $v = \delta E/\delta p$ au sein d'un rayon lumineux *diffère* de la vitesse de phase $u = E/p$ qui intervient dans le calcul. Pour résumer, à l'intérieur de la matière, le concept de photon doit être utilisé avec beaucoup de précaution.

* *

Si une onde électromagnétique possède une amplitude A, la densité de photons d est

$$d = \frac{A^2}{\hbar\omega} \,. \tag{19}$$

Défi 51 pe Pouvez-vous le démontrer?

* *

Montrez que pour une impulsion laser dans le vide, le volume de cohérence augmente au cours de la propagation, alors que le volume occupé dans l'espace des phases reste
Défi 52 f constant. Son entropie est constante, puisque son chemin est réversible.

* *

Un effet typique des «lois» quantiques est la couleur jaune des lampes utilisées dans la plupart des villes pour éclairer les rues. Elles émettent de la lumière jaune pure ayant une fréquence (presque) unique. C'est pour cela qu'aucune autre couleur ne peut être

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 35 Les nuances de bleu dans le ciel et les couleurs des nuages sont dues à différents degrés de diffusion de Rayleigh, de diffusion de Mie et de diffusion Tyndall. (© Giorgio di Iorio)

distinguée sous leur éclairage. D'après l'électrodynamique classique, des harmoniques de cette fréquence lumineuse devraient également être émises. Pourtant, les expériences montrent qu'il n'en est rien et que l'électrodynamique classique est fausse. Cet argument est-il correct? Défi 53 e

* *

Comment pourriez-vous vérifier si une bombe, que l'on pourrait amorcer avec un seul photon, est fonctionnelle sans la faire exploser? Ce casse-tête célèbre, posé par Avshalom Elitzur et Lev Vaidman, nécessite des interférences pour sa résolution. Pouvez-vous trouver un moyen? Défi 54 pe

* *

Qu'arrive-t-il aux photons qui percutent un objet mais qui ne sont ni absorbés ni transmis? D'une façon générale, ils sont diffusés. La *diffusion* est le nom de n'importe quel processus qui change le mouvement de la lumière (ou celui de n'importe quelle autre onde). Les détails du processus de diffusion dépendent de l'objet. Certains processus de diffusion changent seulement la direction du mouvement; d'autres changent aussi la fréquence. Le Tableau 3 donne une vue d'ensemble des processus qui diffusent la lumière. Toutes les propriétés de la diffusion dépendent du matériau qui produit la déflexion de la lumière. L'étude des processus de diffusion explique, entre autres choses, de nombreuses couleurs des matériaux transparents, comme nous le verrons ci-dessous. Page 194

Nous noterons que la courbure de la lumière du fait de la gravité n'est pas appelée diffusion. Pourquoi pas? Défi 55 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 3 Différents types de diffusion de la lumière.

Type de diffusion	Diffuseur	Détails	Exemples
Diffusion de Rayleigh	atomes, molécules	élastique, l'intensité change en $1/\lambda^4$, les diffuseurs sont plus petits que $\lambda/10$	ciel bleu, ciel rouge du soir, fumée de cigarette bleue
Diffusion de Mie	objets transparents, gouttelettes	élastique, l'intensité change en $1/\lambda^{0,5}$ à $1/\lambda^2$, les diffuseurs sont de taille comparable à λ	ciel bleu, soirées rougeoyantes, montagnes lointaines bleus
Diffusion géométrique	arêtes des objets	élastique, les diffuseurs sont plus grands que λ	encore appelée *diffraction*, utilisée lors d'interférences
Diffusion Tyndall	objets non transparents	élastique, l'angle dépend faiblement ou pas du tout de la longueur d'onde	fumée, nuages blancs, brouillard, fumée de cigarette blanche
Diffusion Smekal-Raman	atomes excités, molécules	inélastique, la lumière gagne de l'énergie	utilisée lors d'investigations de l'atmosphère à l'aide de lidars
Diffusion Raman inverse	atomes, molécules	inélastique, la lumière perd de l'énergie	utilisée en recherche des matériaux
Diffusion Thomson	électrons	élastique	utilisée pour déterminer les densités électroniques
Diffusion Compton	électrons	inélastique, les rayons X perdent de l'énergie	démontre la nature particulaire de la lumière (voir page 50)
Diffusion Brillouin	phonons acoustiques, variations de densité dans les solides/fluides	inélastique, décalage de fréquence de quelques GHz	utilisée pour étudier les phonons et pour diagnostiquer les fibres optiques
Diffusion des rayons X de Von Laue	solides cristallins	élastique, due aux interférences sur les plans cristallins	utilisée pour déterminer les structures cristallines; appelée aussi *diffraction!de Bragg*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Un résumé sur la lumière: particule et onde

Pour résumer, la lumière est un faisceau de quanta de lumière, ou photons. Un seul photon correspond à la plus petite intensité lumineuse possible pour une couleur donnée. Les photons, comme tous les quantons, sont bien différents des particules de la vie quotidienne. En fait, il est possible de soutenir que les seuls aspects particulaires (classiques) des photons sont les quantifications de leur énergie, de leur quantité de mouvement et de leur spin. À tous les autres égards, les photons ne sont *pas* comme des petites pierres. Les photons se déplacent à la vitesse de la lumière. Les photons ne peuvent pas être localisés au sein des faisceaux lumineux. Les photons sont indistinguables. Les photons sont des bosons. Les photons n'ont pas de masse, pas de charge électrique et pas de taille. Il est plus exact de dire que *les photons sont des instruments de calcul pour décrire avec précision les observations que l'on fait sur la lumière.*

Ref. 36

Les propriétés étranges des photons sont la raison pour laquelle les premières tentatives de description de la lumière comme étant un faisceau de particules (classiques), tel que celle faite par Newton, ont échoué misérablement, et ont été ridiculisées, à juste titre, par d'autres scientifiques. En effet, Newton soutenait sa théorie contre toutes les évidences expérimentales (tout particulièrement en ce qui concernait les propriétés ondulatoires de la lumière) ce qui est quelque chose qu'un physicien ne devrait jamais faire. C'est seulement après que les gens ont accepté que la lumière puisse être une onde, et donc qu'ils ont découvert et compris que les particules quantiques étaient fondamentalement différentes des particules classiques, que la description du quanton est devenu un succès.

Le quantum d'action implique que *toutes les ondes sont des écoulements de quantons*. En fait, toutes les ondes sont des écoulements *corrélés* de quantons. Ceci est vrai pour la lumière, pour n'importe quelle autre forme de rayonnement, et pour toutes les formes d'onde de matière.

Les relations d'indétermination montrent que même un seul quanton peut être considéré comme une onde. Cependant, chaque fois qu'il interagit avec le reste du monde, il se comporte comme une particule. En fait, il est *essentiel* que toute onde soit constituée de quantons: si ce n'était pas le cas, les interactions ne seraient pas locales et les objets ne pourraient pas du tout être localisés, contrairement à l'expérience.

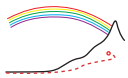
Pour décider si la description ondulatoire ou la description particulaire est la plus appropriée, on peut utiliser le critère suivant. Chaque fois que la matière et la lumière interagissent, il est plus approprié de décrire le rayonnement électromagnétique comme une onde si la longueur d'onde λ satisfait

$$\lambda \gg \frac{\hbar c}{kT} \,, \tag{20}$$

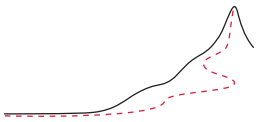
où $k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann et T est la température de la particule. Si la longueur d'onde est beaucoup *plus petite* que la quantité de droite, la description particulaire est plus appropriée. Si les deux côtés sont du même ordre de grandeur, les deux descriptions jouent un rôle. Pouvez-vous expliquer le critère?

Défi 56 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chapitre 3

Le mouvement de la matière – au-delà de la physique classique

> All great things begin as blasphemies.**
> George Bernard Shaw

L'existence d'une action minimale a de nombreuses conséquences importantes pour le mouvement de la matière. Nous commençons par quelques résultats expérimentaux qui montrent que le quantum d'action, également dans le cas de la matière, est en effet la plus petite valeur d'action qui soit mesurable. Ensuite, nous montrons que le quantum d'action implique l'existence d'une phase, et donc de propriétés ondulatoires pour la matière. Finalement, à partir du quantum d'action, nous déduisons la même description pour la matière que celles que nous avons déjà trouvée pour la lumière: les particules de matière se comportent comme des flèches tournantes.

Les verres de vin, les crayons et les atomes – pas de repos

> Otium cum dignitate.***
> Cicéron, *De oratore*.

Si le quantum d'action est le plus petit changement observable dans un système physique, alors deux observations d'un même système doivent toujours être différentes. Il ne peut donc pas y avoir de repos parfait dans la nature. Est-ce vrai? Les expériences montrent que c'est en effet le cas.

Une conséquence simple du manque de repos parfait est l'impossibilité de remplir entièrement un verre de vin. Si on dit qu'un verre est «plein» lorsqu'il est à sa capacité maximale (en tenant compte des effets de tension surfacique pour rendre le raisonnement précis), on voit immédiatement que la situation nécessite que la surface du liquide soit complètement au repos. Ceci ne s'observe jamais. En effet, une surface complètement calme permettrait à deux observations successives d'avoir une différence de moins de $\hbar$. On pourrait essayer de réduire tous les mouvements en diminuant la température du système. Pour obtenir le repos absolu, il faudrait atteindre la température du zéro absolu. Les expériences montrent que ceci est impossible. (En effet, cette impossibilité, qui n'est autre que la *troisième loi de la thermodynamique*, est équivalente à l'existence d'une action minimale.) Toutes les expériences le confirment: *il n'y a pas de repos dans la nature*. Autrement dit, le quantum d'action démontre la vieille vérité qu'un verre de

** «Toutes les grandes choses commencent comme des blasphèmes.»
*** «Reposez-vous avec dignité.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

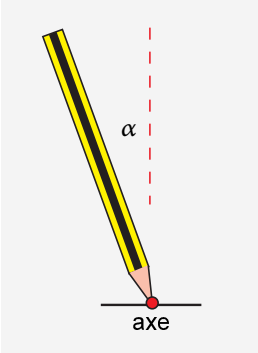


FIGURE 36 Un crayon en train de tomber.

vin est toujours partiellement vide *et* partiellement plein.

L'absence de repos microscopique, prédite par le quantum d'action, est confirmée par de nombreuses expériences. Par exemple, un crayon reposant sur sa pointe *ne peut pas* rester vertical, comme le montre la Figure 36, même si on l'isole de toutes perturbations, telles que les vibrations, les molécules d'air et l'agitation thermique. Cette conclusion (très académique on en conviendra) découle de la relation d'indétermination. En fait, il est même possible de calculer la période de temps au-delà de laquelle le crayon *doit* être tombé. Mais en pratique, les crayons tombent bien plus tôt, parce que dans les conditions habituelles, les perturbations extérieures sont beaucoup plus importantes que les effets du quantum d'action.

Défi 57 d

Mais la conséquence la plus importante de l'absence de repos est toute autre. L'absence de repos pour les électrons au sein des atomes les empêche de tomber sur les noyaux, malgré leur attraction mutuelle. Autrement dit, l'existence et la taille des atomes, et donc de toute matière, est une conséquence directe de l'absence de repos microscopique! Nous explorerons cette conséquence plus en détail ci-dessous. Puisque nous somme constitués d'atomes, nous pouvons dire que nous existons et nous vivons uniquement à cause du quantum d'action.

Page 89

Pas de précision infinie pour les mesures

Non seulement le quantum d'action empêche l'existence du repos, mais le quantum d'action empêche également d'observer ou de mesurer le repos. Pour pouvoir vérifier si un objet est au repos, nous devons observer sa position avec une grande précision. À cause des propriétés ondulatoires de la lumière, il nous faut un photon de haute énergie: seul un photon d'énergie élevée a une longueur d'onde courte et permet donc une mesure précise de la position. Cependant, en raison de cette énergie élevée, l'objet est perturbé. Pire, la perturbation elle-même n'est pas mesurable avec précision. Il n'est donc pas possible de déterminer la position initiale, même en prenant en compte la perturbation. En bref, il n'est pas possible d'observer de repos parfait (même s'il existait).

En effet, toutes les expériences au cours desquelles des systèmes ont été observés avec la plus grande précision confirment que le repos parfait n'existe pas. L'absence de repos a été confirmée pour les électrons, les neutrons, les protons, les ions, les atomes, les molécules, les condensats atomiques et les cristaux. L'absence de repos a même été confirmée

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pour des objets ayant une masse d'environ une tonne, tels que ceux que l'on utilise dans certains détecteurs d'ondes gravitationnelles. Aucun objet n'est jamais au repos.

Le même argument concernant les limitations sur les mesures montre également qu'aucune mesure, de n'importe quelle observable, ne pourra jamais être réalisée avec une précision infinie. Ceci est une autre des conséquences de grande portée du quantum d'action.

Les gaz froids

Le quantum d'action implique que le repos est impossible dans la nature. En fait, même aux températures extrêmement basses, toutes les particules dans la matière sont en mouvement. On dit que ce manque de repos fondamental est dû à ce que l'on appelle les *fluctuations du point zéro*. Un bon exemple est fourni par les mesures récentes des condensats de Bose-Einstein. Ce sont des gaz piégés, avec un petit nombre d'atomes (entre dix et quelques millions), refroidis à des températures extrêmement basses (environ 1 nK). Les pièges permettent de maintenir les atomes suspendus au milieu du vide. Ces gaz froids et piégés peuvent être observés avec beaucoup de précision. En utilisant des techniques expérimentales élaborées, des condensats de Bose-Einstein peuvent être placés dans des états pour lesquels $\Delta p \Delta x$ est presque exactement égal à $\hbar/2$ (bien que jamais en dessous de cette valeur). Ces expériences confirment directement qu'il n'y a pas de repos observable, mais un *flou* fondamental dans la nature. Et le flou est décrit par le quantum d'action.

Ceci nous conduit à un casse-tête intéressant. Dans un objet normal, la distance entre les atomes est beaucoup plus grande que leur longueur d'onde de de Broglie. (Pouvez-vous le confirmer?) Mais aujourd'hui, il est possible de refroidir des objets à des températures extrêmement basses. Aux températures suffisamment bases (moins de 1 nK) la longueur d'onde des atomes peut être plus grande que leur séparation. Pouvez-vous imaginer ce qui se passe dans de telles situations?

Défi 58 e
Ref. 37
Défi 59 e

Les écoulements et la quantification de la matière

> « Die Bewegung ist die Daseinsform der Materie. »
> Friedrich Engels, *Anti-Dühring*.*

Non seulement le quantum d'action rend le repos impossible, mais il rend également impossible toute situation qui ne change pas au cours du temps. L'exemple le plus important de situations (apparemment) stationnaires est celui des *écoulements*. Le quantum d'action implique qu'*aucun* écoulement ne peut être stationnaire. Plus précisément, une action minimale implique qu'aucun écoulement ne peut être continu. *Tous les écoulements fluctuent*. Dans la nature, tous les écoulements sont constitués d'entités minimales; tous les écoulements sont constitués de particules quantiques. Nous avons vu ci-dessus que ceci était valable pour la lumière, mais cela s'applique également aux écoulements de matière. Deux types d'écoulements simples de notre expérience quotidienne confirment directement cette conséquence du quantum d'action: les écoulements de fluides et les écoulements d'électricité.

Ref. 12

* «Le mouvement est la façon d'être de la matière.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les écoulements de fluides et les quantons

L'écoulement de la matière exhibe également des unités minimales. Nous avons mentionné plus tôt dans notre aventure qu'une des conséquences de la structure particulaire des liquides était que l'huile, ou tout autre liquide continu, produisait du *bruit* même lorsqu'elle s'écoulait dans les tuyaux les plus lisses. Nous avons mentionné que le bruit que nous entendons dans nos oreilles dans des situations de silence absolu (par exemple, dans un paysage de montagne enneigé et sans vent ou dans une chambre anéchoïque) était en partie dû à la granularité de l'écoulement du sang dans nos veines. Toutes les expériences confirment que tous les écoulements de matière produisent des vibrations. C'est une conséquence du quantum d'action, et de la granularité de la matière qui en résulte. En fait, il est possible de déterminer le quantum d'action à partir de mesures de bruit dans les fluides.

Vol. I, page 391

Frapper sur les tables et la quantification de la conductivité

Si le courant électrique était un écoulement continu, il serait possible d'observer des valeurs d'actions aussi petites que désirées. Le contre-exemple le plus simple a été découvert en 1996, par José Costa-Krämer et ses collègues. Ils ont mis deux fils métalliques l'un sur l'autre sur une table de cuisine et y ont attaché une pile électrique, un convertisseur de courant en tension (ou plus simplement une résistance) et un oscilloscope à mémoire. Ensuite, ils ont mesuré le courant électrique alors qu'ils *frappaient* sur la table. C'est tout.

Ref. 38, Ref. 39

Un coup frappé sur la table rompt le contact entre les deux fils. Durant la dernière milliseconde avant que les fils ne se séparent, la conductivité (et donc le courant électrique) diminue par échelons réguliers d'environ 7 µA, comme on peut le voir facilement sur l'oscilloscope. La Figure 37 montre un tel résultat de mesure. Cette expérience simple aurait pu détrôner, si elle avait été réalisée quelques années plus tôt, un certain nombre d'autres expériences énormément onéreuses. Ces dernières ont découvert la même quantification au prix de plusieurs millions d'euros chacune, en utilisant des montages expérimentaux complexes à des températures extrêmement basses.

En fait, la quantification de la conductivité apparaît dans n'importe quel contact électrique ayant une petite section transversale. Dans de telles situations, le quantum d'action implique que la conductivité ne peut être qu'un multiple de $2e^2/\hbar \approx (12\,906\,\Omega)^{-1}$. Pouvez-vous confirmer ce résultat? Notez que la conductivité électrique peut être aussi petite que nécessaire; seule la conductivité électrique quantifiée a une valeur minimale de $2e^2/\hbar$.

Défi 60 f

De nombreuses autres expériences élaborées confirment l'observation d'échelons de conductance. Elles nous obligent à conclure qu'il y a une *charge électrique minimale* dans la nature. Cette charge minimale a la même valeur que la charge d'un électron. En effet, il se trouve que les électrons sont des constituants de tous les atomes, au sein d'une construction que nous allons expliquer bientôt. Dans les métaux, un grand nombre d'électrons peuvent se déplacer librement, ce qui explique pourquoi les métaux conduisent si bien l'électricité et qu'ils se comporte comme des miroirs.

En bref, la matière et l'électricité s'écoulent en unités minimales. Suivant le matériau qui s'écoule, les unités d'écoulement minimales peuvent être des «molécules», des «atomes», des «ions» ou des «électrons». Toutes sont des particules *quantiques* (des *quan-*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

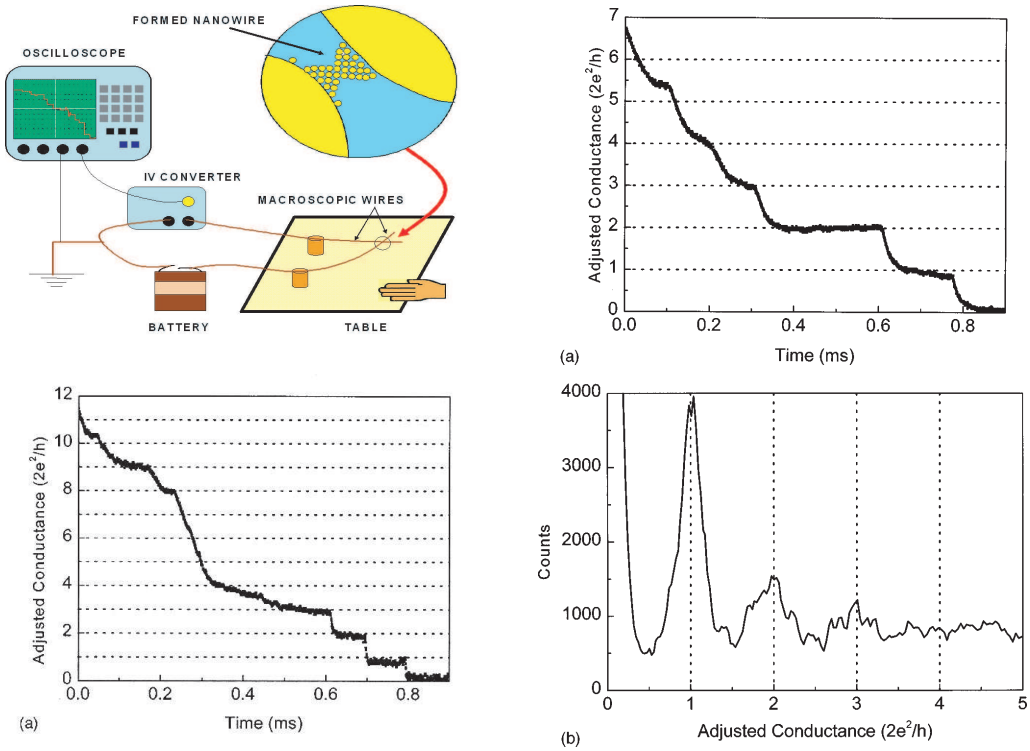


FIGURE 37 Échelons lors de l'écoulement de l'électricité dans des fils métalliques qui se croisent: le montage expérimental, les nanofils à la base de l'effet, et trois résultats de mesures. (© José Costa-Krämer, AAPT de Ref. 39)

tons). En bref, le quantum d'action implique que la matière est constituée de quantons. Les quantons de matière partagent certaines propriétés avec les pierres ordinaires, mais ils en diffèrent également de nombreuses façons. Une pierre a une position et une quantité de mouvement, une masse et une accélération, une taille, une forme, une structure, une orientation et un moment cinétique, ainsi qu'une couleur. Nous allons maintenant explorer chacune de ces propriétés dans le cas des quantons, et voir comment elles sont liées au quantum d'action.

Les quantons de matière et leur mouvement – les ondes de matière

Ref. 40 En 1923 et 1924, le physicien influent Louis de Broglie réfléchissait aux conséquences du quantum d'action pour les particules de matière. Il savait que dans le cas de la lumière, le quantum d'action faisait le lien entre le comportement ondulatoire et le comportement particulaire. Son raisonnement était que la même chose devait s'appliquer à la matière. Il comprit que les courants de particules matérielles ayant toutes la même quantité de mouvement, devaient se comporter comme des ondes, tout comme le faisaient les courants de quanta de lumière. Il prédit donc que, comme pour la lumière, les écoulements de matière cohérente devaient avoir une longueur d'onde λ et une pulsation ω données

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

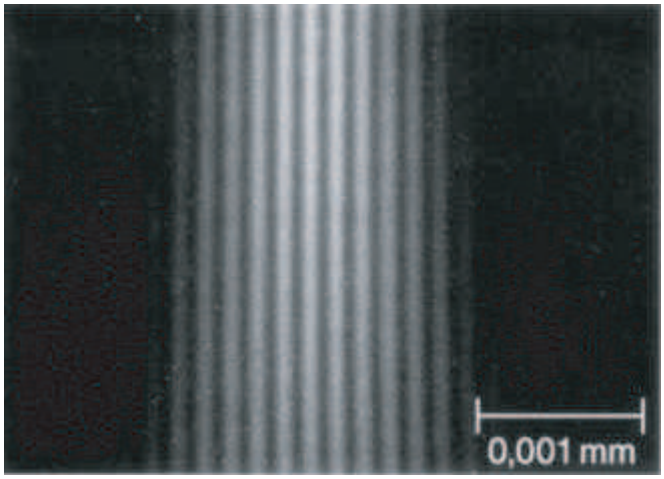


FIGURE 38 Des faisceaux d'électrons diffractent et interfèrent sur plusieurs fentes. (© Claus Jönsson)

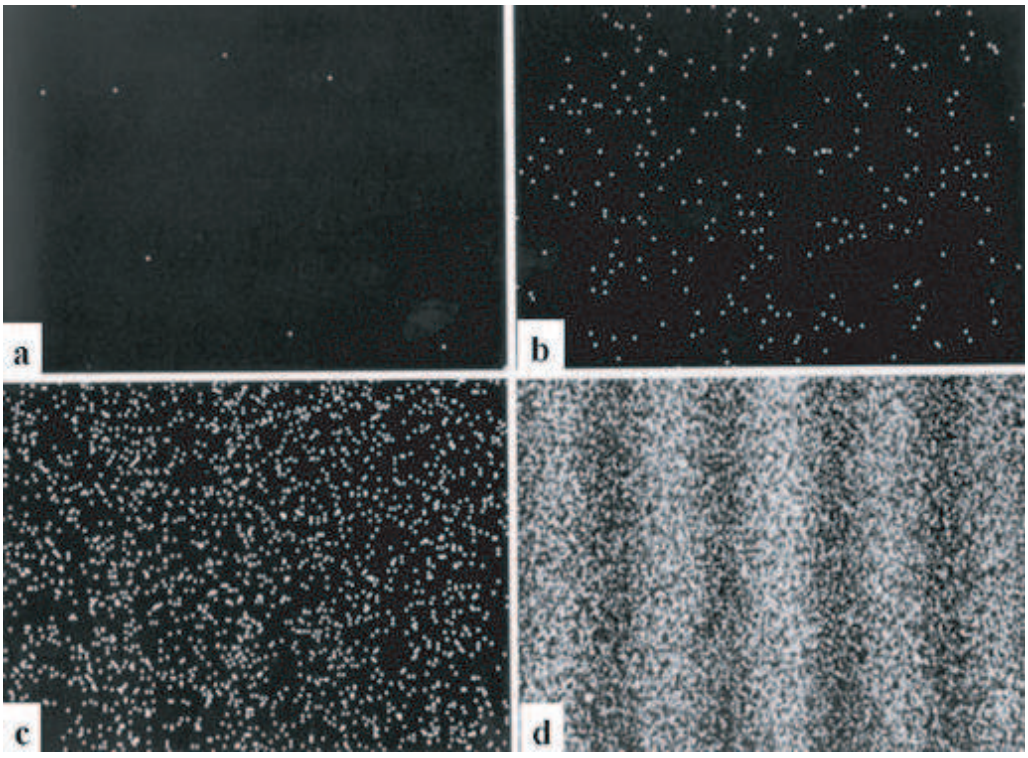


FIGURE 39 Formation au cours du temps d'une figure d'interférence par des électrons, dans le cas d'une expérience des deux fentes à basse intensité: (a) 8 électrons, (b) 270 électrons, (c) 2000 électrons, (d) 6000 électrons, après une exposition de 20 minutes. La dernière image correspond à la situation de la figure précédente. (© Tonomura Akira/Hitachi)

par

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{E}{\hbar}\,, \tag{21}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

où p et E sont respectivement la quantité de mouvement et l'énergie des particules individuelles. De façon équivalente, on peut écrire les relations sous la forme

$$\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k} \quad \text{et} \quad E = \hbar\omega \,. \tag{22}$$

Toutes ces relations établissent que les quantons de matière se comportent, eux aussi, comme des ondes. En ce qui concerne les objets de la vie quotidienne, la longueur d'onde prédite est bien trop petite pour être mesurable (bien que ce ne soit pas le cas pour les particules microscopiques).

Peu de temps après la prédiction de de Broglie, des expériences commencèrent à la confirmer. On observait des courants de matière qui diffractaient, qui se réfractaient et qui produisaient des interférences, et toutes les observations correspondaient aux valeurs prédites par de Broglie. À cause des petites longueurs d'onde des quantons, des expériences minutieuses sont nécessaires pour détecter ces effets. Mais l'une après l'autre, toutes les confirmations expérimentales des propriétés ondulatoires de la lumière ont été reproduites pour des faisceaux de matière. Par exemple, tout comme la lumière est diffractée lorsqu'elle passe près de l'arête d'un objet ou à travers une fente, la matière est également diffractée dans ces situations. Ceci est vrai même pour les électrons, les plus simples des particules de matière de la vie quotidienne, comme le montre la Figure 38. En fait, l'expérience avec les électrons est assez difficile. Elle fut réalisée pour la première fois par Claus Jönsson à Tübingen en 1961. En 2002 elle a été désignée comme étant la plus belle expérience de toute la physique. De nombreuses années après Jönsson, l'expérience a été reproduite avec un microscope électronique modifié, comme le montre la Figure 39.

Ref. 41

Inspirés par les interféromètres pour la lumière, des chercheurs commencèrent à construire des interféromètres *à onde de matière*. Ces derniers ont été utilisés dans de nombreuses expériences de toute beauté, comme on va le découvrir. Aujourd'hui, les interféromètres à onde de matière fonctionnent avec des faisceaux d'électrons, de nucléons, de noyaux, d'atomes et même de grosses molécules. De la même façon que les observations d'interférences lumineuses démontrent le caractère ondulatoire de la lumière, les figures d'interférence que l'on observe avec des faisceaux de matière démontrent le caractère ondulatoire de la matière. Elles confirment également la valeur de $\hbar$.

Vol. V, page 142

Ref. 42

Vol. III, page 101

Comme la lumière, la matière est constituée de particules. Comme la lumière, la matière se comporte comme une onde lorsqu'elle concerne un grand nombre de particules ayant toutes la même quantité de mouvement. Mais bien que les faisceaux de grosses molécules se comportent comme des ondes, ce n'est pas le cas pour les objets de la vie quotidienne, tels que des voitures sur l'autoroute. Il y a plusieurs raisons à cela. Premièrement, pour les voitures sur l'autoroutes la longueur d'onde pertinente est extrêmement petite. Deuxièmement, la vitesse des voitures varie trop. Troisièmement, il est possible de compter les voitures. En résumé, il n'est pas possible de produire des faisceaux cohérent avec des voitures ayant toutes la même vitesse.

Si la matière se comporte comme une onde, nous pouvons en tirer une conclusion étrange. Pour n'importe quelle onde, la position et la longueur d'onde ne peuvent pas être toutes les deux définies avec précision en même temps: les indéterminations du

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nombre d'onde $k = 2\pi/\lambda$ et de la position X obéissent à la relation

$$\Delta k \Delta X \geq \frac{1}{2} \,. \tag{23}$$

De façon similaire, pour toute onde, la pulsation $\omega = 2\pi f$ et l'instant T de son pic d'amplitude ne peuvent pas être tous les deux définis avec précision. Leurs indéterminations sont liées par

$$\Delta \omega \Delta T \geq \frac{1}{2} \,. \tag{24}$$

En utilisant les propriétés des ondes de de Broglie de la matière (22), nous obtenons

$$\Delta p \Delta X \geqslant \frac{\hbar}{2} \qquad \text{et} \qquad \Delta E \Delta T \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{25}$$

Ces relations célèbres s'appellent les *relations d'indétermination d'Heisenberg*. Elles ont été découvertes par Werner Heisenberg en 1925. Elles sont valides pour toutes les particules quantiques, qu'elles soient matérielles ou de rayonnement. Les relations d'indétermination établissent qu'il n'y a aucun moyen d'attribuer simultanément à un système quantique une quantité de mouvement précise et une position précise, ni de lui attribuer simultanément une énergie précise et un âge précis. Plus une des grandeurs est connue avec précision, moins l'autre l'est.* Par conséquent, les quantons de matière (un peu comme les pierres) peuvent *toujours* être localisés, mais uniquement de manière approximative. D'autre part, nous avons vu que bien souvent, les photons ne pouvaient pas être localisés.

Les deux relations d'indétermination ont été vérifiées expérimentalement dans leurs moindres détails. Toutes les expériences les confirment. En fait, toute expérience qui démontre que la matière se comporte comme une onde est une confirmation de la relation d'indétermination, et vice versa.

Lorsque deux variables sont liées par des relations d'indétermination, on dit qu'elles sont *complémentaires* l'une de l'autre. Niels Bohr explora systématiquement toutes les
Défi 61 e paires possibles. Vous pouvez également le faire vous-même. Bohr était profondément fasciné par l'existence d'un principe de complémentarité, et il l'étendit plus tard à des aspects plus philosophiques. Lors d'une scène bien connue, quelqu'un lui demanda quelle était la grandeur complémentaire de la précision. Il répondit: «la clarté».

Nous remarquons que les quantons de matière habituels (*réels*) se déplacent toujours plus lentement que la lumière. Du fait du flou inhérent au mouvement quantique, il ne doit pas être surprenant d'apprendre qu'il existe des exceptions. En effet, dans certains cas extrêmement spéciaux, le quantum d'action autorise l'existence de particules qui se déplacent plus vide que la lumière (que l'on appelle des particules *virtuelles*) et que nous
Page 219 rencontrerons plus loin.

En résumé, le quantum d'action signifie que les quantons de matière ne se comportent pas comme des pierres ponctuelles, mais comme des ondes. En particulier, comme pour

* Un agent de police arrêta la voiture que conduisait Werner Heisenberg. «Savez-vous à quelle vitesse vous rouliez?» «Non, mais je sais exactement où j'étais.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

les ondes, les valeurs de la position et de la quantité de mouvement des quantons ne peuvent pas être toutes deux définies exactement. Les valeurs sont floues; la position et la quantité de mouvement sont indéterminées. Plus l'une des deux est connue avec précision, moins l'autre est connue avec précision.

La masse et l'accélération des quantons

Les quantons de matière, tout comme les pierres, ont une masse. En effet, il est possible de détecter les impacts de particules individuelles (électrons, atomes ou molécules) lorsque des appareils de mesure sensibles sont utilisés. Il est également possible de ralentir ou d'accélérer les quantons. Nous avons déjà exploré certaines de ces expériences dans la section sur l'électrodynamique. Cependant, les quantons sont différents des cailloux. En utilisant la relation d'indétermination entre le temps et l'énergie, vous pouvez déduire que:

Vol. III, page 30

Défi 62 e

$$a \leqslant \frac{2mc^3}{\hbar} \,. \tag{26}$$

Il y a donc une *accélération maximale* pour les quantons.* Il se trouve en effet qu'aucune particule n'a jamais été observée avec une accélération plus grande que cette valeur. En fait, aucune particule n'a jamais été observée avec une accélération même *proche* de cette valeur. Le quantum d'action empêche donc le repos, mais il limite également l'accélération.

Ref. 43

Pourquoi les atomes ne sont-ils pas plats? Pourquoi les formes existent-elles?

Le quantum d'action détermine toutes les tailles dans la nature. En particulier, il détermine toutes les *formes*. Commençons par explorer ce sujet.

Des expériences montrent que tous les quantons *composés*, tels que les atomes ou les molécules, ont des structures de taille non nulle et souvent de forme complexe. La taille et la forme de tout quanton composé sont dues au mouvement de leurs constituants. Le mouvement des constituants est dû au quantum d'action, mais comment se déplacent-ils?

En 1901, Jean Perrin (de même que Nagaoka Hantaro, indépendamment en 1904) proposa que les atomes soient de petits «systèmes solaires». En 1913, Niels Bohr repris cette idée en la combinant avec le quantum d'action. Il trouva qu'il pouvait prédire la taille et la couleur des atomes d'hydrogène, deux propriétés qui n'avaient pas encore été comprises jusque-là. Nous ferons le calcul plus loin. Même Bohr savait que personne ne saisissait complètement le sens des calculs, car ils semblaient supposer que les atomes d'hydrogène étaient plats, comme le système solaire. Mais, tout d'abord, les

Ref. 44

Ref. 45

Page 206

* On notera que cette limite de l'accélération est différente de la limite de l'accélération due à la relativité générale:

$$a \leqslant \frac{c^4}{4Gm} \,. \tag{27}$$

En particulier, la limite quantique (26) s'applique aux particules microscopiques, alors que la limite relativiste s'applique aux systèmes macroscopiques. Pouvez-vous confirmer que, dans chaque domaine, la limite pertinente est la plus petite des deux?

Défi 63 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

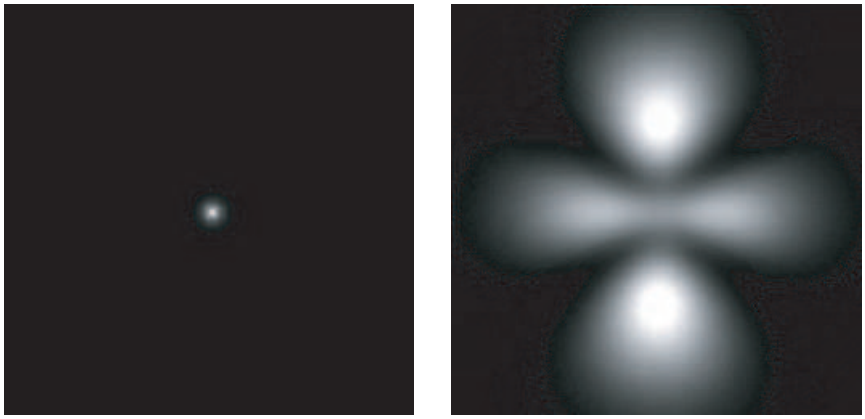


FIGURE 40 Nuages de probabilité: un atome d'hydrogène dans son état fondamental sphérique (à gauche) et dans un état excité non sphérique (à droite) tels que les verrait un observateur qui voyagerait autour. (Film QuickTime produit par le progiciel de Dean Dauger «Atom in a Box» disponible sur daugerresearch.com)

atomes que l'on observe sont sphériques. Ensuite, une forme aplatie contredirait le quantum d'action. En effet, le quantum d'action implique que le mouvement des constituants quantiques est flou. Par conséquent, tous les quantons composés, tels que les atomes ou les molécules, doivent être constitués de *nuages* de constituants.

Défi 64 f

En bref, le quantum d'action prédit que

▷ Les atomes sont des nuages sphériques.

Les expériences et la théorie confirment que la taille de n'importe quel atome est due au nuage (à la distribution de probabilité) de ses constituants les plus légers: les électrons. Le quantum d'action établit donc que les atomes ou les molécules ne sont pas des balles dures, comme Démocrite ou Dalton le croyait, mais qu'ils sont des nuages. *La matière est faite de nuages*.

Les nuages électroniques des atomes ne sont pas infiniment durs, mais peuvent, dans une certaine limite, s'interpénétrer et être déformés. La région dans laquelle cette déformation se produit s'appelle une *liaison* chimique, et les liaisons conduisent aux molécules. Les molécules, parce qu'elles sont constituées d'atomes, sont composées de nuages sphériques (déformés). Les liaisons conduisent également aux liquides, aux solides, aux fleurs et aux gens. Une exploration détaillée confirme que toutes les formes, depuis celles des molécules les plus simples jusqu'à la forme des gens, sont dues aux interactions entre les électrons et le noyau des atomes constituants. De nos jours, il est possible de calculer la forme des molécules avec une grande précision. Les petites molécules, comme celle de l'eau, ont des formes qui sont assez rigides, bien que dotés d'un certain degré d'élasticité. Les grosses molécules, telles que les polymères ou les peptides, ont des formes flexibles. Ces changements de forme sont essentiels pour les effets qu'ils ont au sein de la cellule, et donc pour notre survie. De nombreuses recherches en biophysique et en biochimie explorent les conséquences des formes des molécules.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

En résumé, le quantum d'action implique l'existence des formes, de même que leurs fluctuations. Par exemple, si une longue molécule est maintenue fixe par ses deux extrémités, elle ne peut pas rester au repos entre les deux. Il est aujourd'hui facile de réaliser de telles expériences, par exemple avec l'ADN. En fait, toutes les expériences confirment que le quantum d'action empêche le repos, produit les tailles et les formes, et permet la chimie et la vie.

Dans la nature, toutes les tailles et toutes les formes sont dues au quantum d'action. Or, tout objet macroscopique et tout objet quantique n'ayant pas une forme sphérique, est capable de tourner sur lui-même. Nous allons donc explorer ce que le quantum d'action a à dire en ce qui concerne la rotation.

La rotation, la quantification du moment cinétique et la pénurie de pôles Nord

> Tristo è quel discepolo che non avanza il suo maestro.
>
> Leonardo da Vinci*

Dans la vie quotidienne, la rotation est un type de mouvement fréquent. Les roues sont partout autour de nous. Il se trouve que le quantum d'action a des conséquences importantes pour le mouvement de rotation. Tout d'abord, nous notons que l'action et le moment cinétique ont la même dimension physique: tous les deux se mesurent en Js ou en Nms. Il suffit juste d'une analyse toute simple pour montrer que si la matière et le rayonnement ont une quantité de mouvement et une longueur d'onde qui sont liés par le quantum d'action, alors le moment cinétique ne prend que des valeurs multiples du quantum d'action. Ce beau raisonnement est dû à Dicke et Wittke.

Ref. 46

Imaginez une clôture circulaire, composée de N palis d'acier verticaux séparés par une distance $a = 2\pi R/N$, comme le montre la Figure 41. Au centre de la clôture, imaginez une source de matière ou de rayonnement qui puisse émettre des particules vers la clôture dans une direction quelconque que l'on peut choisir. La quantité de mouvement d'une telle particule est $p = \hbar k = 2\pi\hbar/\lambda$. Aux intervalles entre les palis de la clôture l'onde va interférer. En dehors de la clôture, la direction du mouvement de la particule est déterminée par la condition d'interférence constructives. Autrement dit, l'angle θ, décrivant la direction du déplacement en dehors de la clôture, est donné par $a \sin\theta = M\lambda$, où M est un entier. Lors du changement de direction dû au processus d'interférence, la clôture reçoit une quantité de mouvement $p \sin\theta$, ou un moment cinétique $L = pR \sin\theta$. En combinant toutes ces expressions, nous trouvons que le moment cinétique transféré à la clôture est

Défi 65 f

$$L = NM\hbar \,. \tag{28}$$

Autrement dit, le moment cinétique de la clôture est un multiple entier de $\hbar$. Les clôtures ne peuvent avoir que des moments cinétiques intrinsèques entiers (en unités de $\hbar$). La généralisation de ce raisonnement à tous les corps est également correcte. (Bien sûr, cette dernière affirmation n'est qu'une suggestion, pas une démonstration.)

* «Triste est le disciple qui ne surpasse pas son maître.» Cette assertion, tirée de l'un de ses carnets, le Codex Forster III, est sculptée en gros caractères dans la salle de cours de chimie de l'Université de Rome *La Sapienza*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

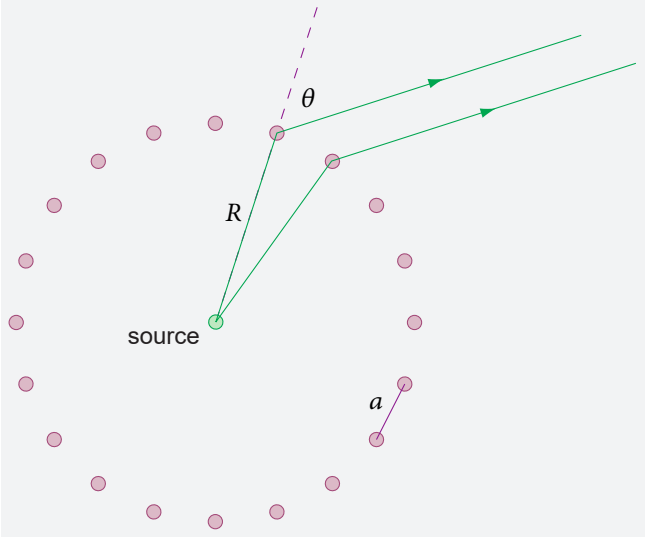


FIGURE 41 La quantification du moment cinétique.

▷ La valeur mesurée du moment cinétique intrinsèque des objets est toujours un multiple de $\hbar$.

La théorie quantique établit donc que le moment cinétique de tout objet augmente par échelons. Le moment cinétique est quantifié. Ce résultat est confirmé par toutes les expériences.

Mais la rotation a des aspects encore plus intéressants. Grâce au quantum d'action, tout comme la quantité de mouvement est en général floue, il en est de même pour le moment cinétique. Il y a une relation d'indétermination pour le moment cinétique L. La variable complémentaire est l'angle de phase φ de la rotation. La relation d'indétermination peut s'exprimer de plusieurs façons. L'approximation la plus simple, et qui n'est donc *pas* l'expression exacte, est

Ref. 47 Ref. 48 Page 53

$$\Delta L \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{29}$$

Ceci est bien évidemment une approximation: la relation est seulement valable pour les gros moments cinétiques. Malgré tout, l'expression nous renseigne qu'une rotation se comporte de façon similaire à une translation. L'expression ne peut pas être valable pour les petites valeurs de moments cinétiques, car $\Delta\varphi$ ne peut pas, par définition, augmenter au-delà de 2π. En particulier, les états propres du moment cinétique ont $\Delta L = 0$.*

* Une formulation exacte de la relation d'indétermination pour le moment cinétique est

$$\Delta L \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |1 - 2\pi P(\pi)| \,, \tag{30}$$

où $P(\pi)$ est la probabilité normalisée pour que la position angulaire ait la valeur π. Pour un état propre du moment cinétique, on a $\Delta\varphi = \pi/\sqrt{3}$ et $P(\pi) = 1/2\pi$. Cette expression exacte a été testée et confirmée par les expériences. Ref. 49

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L'indétermination du moment cinétique apparaît pour tous les objets macroscopiques. On peut dire que l'indétermination apparaît dans tous les cas pour lesquels la phase angulaire du système peut être mesurée.

La quantification et l'indétermination du moment cinétique ont des conséquences importantes. En suivant un raisonnement classique, les pôles de la Terre sont les lieux qui ne bougent pas lorsqu'ils sont observés par un observateur non tournant. Par conséquent, en ces lieux la matière aurait une position définie et une quantité de mouvement définie. Cependant, le quantum d'action l'interdit. Il ne peut y avoir de pôle Nord sur Terre. Plus précisément, l'idée d'un axe de rotation *fixe* est une approximation, qui n'est en général pas valide. Ceci s'applique en particulier aux particules quantiques qui tournent sur elles-mêmes.

La rotation des quantons

Les conséquences du quantum d'action sur la rotation des particules microscopiques, telles que les atomes, les molécules ou les noyaux, sont particulièrement intéressantes. Nous notons à nouveau que l'action et le moment cinétique ont les mêmes unités. La précision avec laquelle le moment cinétique peut être mesuré dépend de la précision de l'angle de rotation. Mais si une particule *microscopique* tourne sur elle-même, il se peut que cette rotation ne soit pas observable: une situation qui contraste fondamentalement avec le cas des objets *macroscopiques*. Les expériences confirment en effet que de nombreuses particules microscopiques ont des angles de rotation qui ne sont pas observables. Par exemple, dans beaucoup de cas (bien que pas tous), un noyau atomique qui aurait tourné sur lui-même d'un demi-tour ne peut pas être distingué d'un noyau qui n'aurait pas tourné.

Si une particule microscopique a un angle de rotation inobservable *minimal*, le quantum d'action implique que le moment cinétique de cette particule *ne peut pas* être nul. Elle doit toujours tourner sur elle-même. Donc, il nous faut vérifier, pour chaque particule, quel est son plus petit angle de rotation inobservable. Les physiciens ont développé des expériences pour vérifier toutes les particules de la nature. Ils ont trouvé des angles inobservables minimales (selon le type de particule) de 0, 4π, 2π, $4\pi/3$, π, $4\pi/5$, $2\pi/3$, etc.

Prenons un exemple. Certains noyaux ont un angle de rotation inobservable minimale d'*un demi-tour*. C'est le cas pour un noyau prolate (un qui ressemble à un ballon de rugby) tournant autour de son petit axe, comme par exemple pour un noyau de ^{23}Na. Dans ce cas, le plus grand angle de rotation observable ainsi que l'indétermination sont donc tous les deux d'*un quart de tour*. Puisque le changement (l'action) produit par une rotation est le nombre de tours multiplié par le moment cinétique, nous trouvons que le moment cinétique de ce noyau est $2 \cdot \hbar$.

D'une façon générale, nous déduisons à partir des valeurs d'angle minimales que le moment cinétique d'une particule microscopique peut être 0, $\hbar/2$, $\hbar$, $3\hbar/2$, $2\hbar$, $5\hbar/2$, $3\hbar$, etc. Autrement dit, le moment cinétique intrinsèque d'une particule, que l'on appelle usuellement son *spin*, est un multiple entier de $\hbar/2$. Le spin décrit comment une particule se comporte lorsqu'elle tourne sur elle-même.

Comment une particule peut-elle tourner sur elle-même? À ce stade, nous ne savons pas encore comment nous *représenter* la rotation. Mais nous pouvons l'*entrevoir*. Tout

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

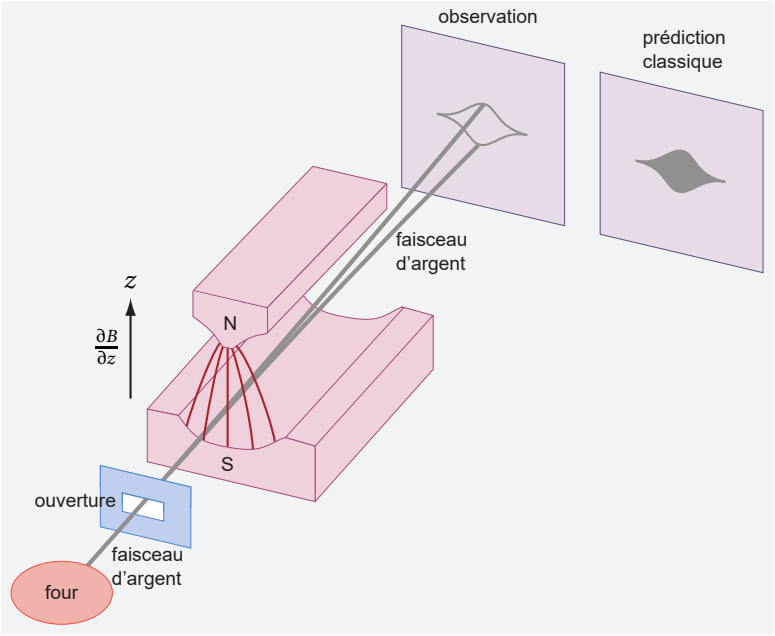


FIGURE 42
L'expérience de Stern et Gerlach.

comme nous avons montré que la lumière était faite d'entités qui tournaient sur elles-mêmes, toute matière, y compris les électrons, peut être *polarisée*. Ceci est démontré clairement par la célèbre expérience de Stern et Gerlach.

L'argent, Stern et Gerlach – la polarisation des quantons

Après une année de travail acharné, en 1922, Otto Stern et Walther Gerlach* menèrent à bien une belle expérience qui étudiait la polarisation des quantons de matière. Ils savaient que les champs magnétiques inhomogènes agissaient comme des polariseurs pour les charges tournantes. Des charges tournantes sont présentes dans tous les atomes. Ils firent donc passer un faisceau d'atomes d'argent, extraits d'un four par évaporation, dans un champ magnétique inhomogène. Ils ont alors trouvé que le faisceau se divisait en *deux faisceaux séparés*, comme le montre la Figure 42. Aucun atome ne quittait la région soumise au champ magnétique dans des directions intermédiaires. Ceci est en contradiction totale avec ce à quoi on s'attendrait en physique classique.

Ref. 50

La séparation en *deux* faisceaux est une propriété intrinsèque des atomes d'argent. Aujourd'hui on sait que cela est dû à leur spin. Les atomes d'argent ont un spin $\hbar/2$ et, selon leur orientation dans l'espace, ils sont déviés soit dans la direction de l'inhomogénéité du champ, soit dans la direction opposée. La séparation du faisceau est un effet purement quantique: il n'y a pas d'option intermédiaire. Ainsi, l'expérience de Stern et Gerlach fournit une des démonstrations les plus claires que la physique classique comporte des lacunes dans le domaine microscopique. En 1922, le résultat semblait

* Otto Stern (1888 – 1969) et Walther Gerlach (1889 – 1979) ont travaillé ensemble à l'Université de Francfort. Par la suite, pour avoir mesuré le moment magnétique anormal du proton, Stern reçu le prix Nobel de Physique en 1943, après qu'il a dû fuir le national-socialisme.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

si étrange qu'il fut étudié dans tous ses détails partout dans le monde.

Lorsqu'un des deux faisceaux, disons le faisceau «up»*, est envoyé à travers un deuxième appareil, tous les atomes en ressortent dans le faisceau «up». L'autre sortie possible, le faisceau «down», n'est pas utilisée dans ce cas. Autrement dit, les faisceaux «up» et «down», contrairement au faisceau initial, ne peuvent pas être séparés une nouvelle fois. Ceci n'est pas une surprise.

Mais si le deuxième appareil est tourné de $\pi/2$ par rapport au premier, il se forme à nouveau deux faisceaux (que l'on peut noter ici «droit» et «gauche»). Et ceci est indépendant du fait que le faisceau entrant provienne directement du four ou de la partie «up» du faisceau initial. Un appareil partiellement tourné produit une séparation partielle, inégale. Les proportions des deux faisceaux finaux dépendent de l'angle de rotation du deuxième appareil.

Nous notons directement que si on sépare le faisceau sortant du four d'abord verticalement puis ensuite horizontalement, nous obtenons un résultat différent de celui obtenu pour des séparations du faisceau dans l'ordre inverse. (Vous pouvez vérifier cela par vous-même.) Les processus de séparation ne commutent pas. Lorsque le résultat final dépend de l'ordre de deux opérations, les physiciens disent que les deux opérations sont *non commutatives*. Puisque toutes les mesures sont également des processus physiques, on en déduit que les mesures et les processus des systèmes quantiques sont, en général, non commutatifs.

Défi 66 f

La séparation des faisceaux dépend de la direction. Les faisceaux de matière se comportent presque de la même façon que les faisceaux de lumière polarisée. En effet, le champ magnétique inhomogène agit sur la matière un peu comme un polariseur agit sur la lumière. Les faisceaux «up» et «down», pris dans leur ensemble, définissent une direction de polarisation. En effet, il est possible de faire tourner la direction de polarisation à l'aide d'un champ magnétique *homogène*. Et un faisceau que l'on a fait tourner, placé dans un aimant que l'on n'a pas tourné, se comporte comme un faisceau que l'on n'a pas fait tourner, placé dans un aimant que l'on a tourné.

En résumé, les quantons de matière peuvent être polarisés. On peut se représenter la polarisation comme étant l'orientation d'un axe de rotation interne du quanton massique. Pour être consistent, il faut s'imaginer l'axe de rotation comme faisant un mouvement de précession autour de la direction de polarisation. Donc, les particules quantiques massiques ressemblent aux photons également en ce qui concerne leur polarisabilité.

Curiosités et défis amusants concernant la matière quantique

> It is possible to walk while reading, but not to read while walking.**
>
> Serge Pahaut

Le quantum d'action implique qu'il n'y a *pas de fractales* dans la nature. Tout est constitué de particules. Et les particules sont des nuages. La théorie quantique requière que toutes les formes de la nature soient des *nuages* «flous».

* Nous utilisons dans ce texte les expressions anglaise «up» et «down» («haut» et «bas») car ce sont les plus couramment utilisées dans les manuels de physique quantique. Nous les retrouverons plus loin lorsque nous parlerons du spin et des propriétés des particules élémentaires [N.d.T.].

** «Il est possible de marcher en lisant, mais pas de lire en marchant.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

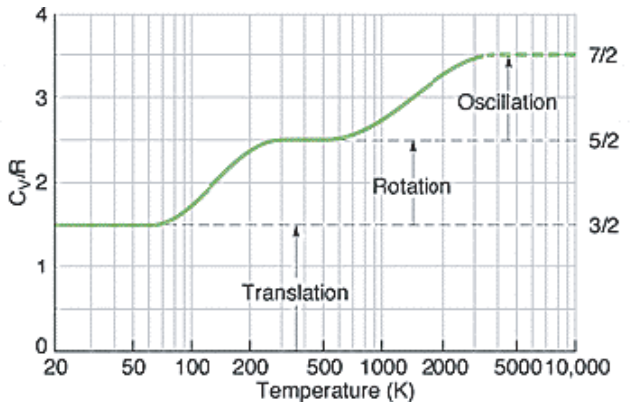


FIGURE 43 Un graphique idéalisé de la capacité thermique de l'hydrogène en fonction de la température. (© Peter Eyland)

* *

Est-ce que les atomes peuvent tourner sur eux-mêmes? Est-ce qu'un atome qui tombe sur le sol peut rouler sous la table? Est-ce qu'il est possible de mettre des atomes en rotation rapide? La réponse à toutes ces questions est «non», parce que le moment cinétique est quantifié. De plus, les atomes ne sont pas des objets solides, mais des nuages. Le cas macroscopique d'un objet tournant sur lui-même de plus en plus lentement jusqu'à ce qu'il s'arrête, n'existe pas dans le monde microscopique. Le quantum d'action ne le permet pas.

Ref. 51

* *

La lumière se réfracte lorsqu'elle entre dans un matériau dense. Est-ce que les ondes de matière se comportent de la même façon? Oui, elles le font. En 1995, David Pritchard le montra pour des ondes de sodium entrant dans un gaz d'hélium et de xénon.

Ref. 52

* *

De nombreux effets quantiques conduisent à des courbes qui présentent des échelons. Un exemple important est la capacité thermique molaire du gaz H_2, que montre la Figure 43. En augmentant la température de 20 à 8 000 K, la capacité thermique molaire subit deux échelons, un premier de $3R/2$ à $5R/2$, et ensuite à $7R/2$. Pouvez-vous en expliquer la raison?

* *

La plupart des exemples de mouvement quantique que nous avons donnés jusque-là sont dus à des effets électromagnétiques. Pouvez-vous argumenter que le quantum d'action doit également s'appliquer aux mouvements nucléaires, et en particulier aux interactions nucléaires?

Défi 67 e

* *

Il existe de nombreuses autres formulations du principe d'indétermination. Une qui est intéressante est celle que l'on doit à de Sabbata et Sivaram, qui ont expliqué en 1992 que

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

la relation mystérieuse suivante entre la température et le temps était également valide:

$$\Delta T \Delta t \geqslant \hbar/k. \tag{31}$$

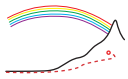
Ref. 53 Ici, k est la constante de Boltzmann. Tous les tests expérimentaux jusqu'à aujourd'hui ont confirmé le résultat.

* *

Voici une question un peu délicate: quel est le moment d'inertie d'un électron?
Défi 68 f Pourquoi?

Premier résumé sur le mouvement des particules quantiques

Pour résumer, la séparation «digitale» du faisceau que l'on voit dans l'expérience de Stern et Gerlach et les propriétés ondulatoires de la matière nous obligent à repenser notre description du mouvement. Elles montrent que le mouvement de la matière microscopique découle du quantum d'action, la valeur observable minimale pour l'action. En relativité restreinte, l'existence d'une vitesse maximale nous avait obligé à introduire le concept d'espace-temps, et ensuite à affiner notre description du mouvement. En relativité générale, la force maximale nous avait obligé à introduire les concepts d'horizon et de courbure, et ensuite, à affiner une nouvelle fois notre description du mouvement. Au stade actuel, l'existence du quantum d'action et le comportement ondulatoire de la matière nous obligent à prendre deux mesures similaires: nous introduisons tout d'abord le concept de fonction d'onde, et ensuite, nous affinons notre description du mouvement de la matière.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 4

La description quantique de la matière et de son mouvement

> Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei!**
>
> Max Born

Ref. 54

Dans la vie quotidienne comme en physique classique, nous disons qu'un système *a* une position, qu'il *est* orienté dans une certaine direction, qu'il *a* un axe de rotation, et qu'il *est* dans un état avec une quantité de mouvement spécifique. En physique classique, nous pouvons parler de la sorte parce que l'*état* (la situation dans laquelle un système «est» ainsi que les propriétés qu'un système «a») coïncide avec les *résultats des mesures*. Il coïncide parce qu'il est toujours possible d'imaginer que les mesures ont un effet négligeable sur le système.

Cependant, à cause de l'existence d'une action minimale, l'interaction nécessaire à la réalisation d'une mesure sur un système *ne peut pas* être réduite à une valeur arbitrairement petite. Donc, le quantum d'action *ne nous permet plus* de continuer à dire qu'un système *a* une quantité de mouvement, qu'il *a* une position ou qu'il *a* un axe de rotation. Le quantum d'action nous oblige à utiliser l'idée de la flèche tournante et à introduire le concept de *fonction d'onde*, ou de *fonction d'état*. Voyons pourquoi et comment.

Les états et les mesures – la fonction d'onde

Page 94

L'expérience de Stern et Gerlach nous montre que les valeurs de l'*orientation* du spin que l'on mesure ne sont *pas* intrinsèques, mais qu'elles résultent du processus de mesure (dans ce cas, il s'agit de l'interaction avec le champ inhomogène qui est appliqué). Ceci contraste avec l'*amplitude* du spin, qui est intrinsèque et indépendante de l'état et de la mesure. En bref, le quantum d'action nous oblige à distinguer soigneusement trois concepts:

— l'état du système;
— l'opération de mesure;
— le résultat de la mesure.

Contrairement au cas classique de la vie quotidienne, l'*état* d'un système quantique (les propriétés qu'un système «a») n'est *pas* décrit par les résultats des mesures. L'illustration la plus simple de cette différence est le système constitué d'une seule particule dans l'expérience de Stern et Gerlach. L'expérience montre que la mesure du spin sur une

** «Ces quanta sont une sale pagaille sans espoir!»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

particule dans un état générale (lorsqu'elle sort du four) produit parfois «up» (disons +1), et produit parfois «down» (disons −1). Donc, un atome le plus général (à la sortie du four) n'a pas d'orientation intrinsèque. Ce n'est qu'*après* la mesure que l'atome se trouve soit dans l'état «up», soit dans l'état «down».

On trouve également qu'alimenter un second appareil de mesure avec des états «up» ne produit que des états «up»: il se trouve donc que certains états spéciaux, appelés les *états propres*, ne sont pas affectés par une mesure.

Finalement, l'expérience de Stern et Gerlach et ses variantes montrent que les états peuvent tourner lorsqu'on leur applique des champs: les états des atomes ont une direction (une orientation) dans l'espace. Les expériences montrent également que les états tournent au cours du déplacement des atomes dans l'espace.

Les observations expérimentales peuvent être décrites de façon assez simple. Puisque les mesures sont des opérations qui prennent un état en entrée et produisent un état de sortie et un résultat de mesure, on peut dire que:

- Les *états* sont décrits par des flèches tournantes (des vecteurs tournants).
- Les *mesures* des observables sont des opérations sur les vecteurs d'états.
- Les *résultats des mesures* sont des *nombres réels*. Tout comme en physique classique, ils dépendent généralement de l'observateur.

En particulier, nous avons distingué deux concepts qui ne sont pas distinguées en physique classique: les états et les résultats des mesures. Étant donnée cette distinction, la théorie quantique découle assez simplement, comme nous allons le voir.

Puisque le quantum d'action n'est pas infiniment petit, toute mesure d'une grandeur observable est une interaction avec un système et est donc une transformation de son état. Par conséquent, la physique quantique décrit les observables physiques comme des *opérateurs* ou, de façon équivalente, comme des transformations. L'expérience de Stern et Gerlach montre clairement que l'interaction avec le champ influence les atomes: certains dans un sens, et d'autres dans un autre sens. En fait, toutes les expériences montrent que:

- Sur le plan mathématique, les états sont des *vecteurs complexes* (des flèches tournantes) dans un espace abstrait. Cet espace de tous les états possibles (toutes les flèches possibles) est un *espace!de Hilbert*.
- Sur le plan mathématique, les mesures sont des transformations linéaires. Plus précisément, elles sont décrites par des *opérateurs* (des matrices) auto-adjoints (*hermitiens*).
- Sur le plan mathématique, les *changements de point de vue* sont décrits par des *opérateurs* (des matrices) *unitaires* qui agissent sur les états (sur les flèches) et sur les opérateurs de mesure.

Page 267

Les expériences de la mécanique quantique montrent également que la mesure d'une observable ne peut donner qu'un résultat qui est une *valeur propre* de la transformation correspondante. Les états qui résultent de la mesure, ces états exceptionnels qui ne sont *pas* influencés lorsque la variable correspondante est mesurée, sont les *vecteurs propres*. En bref, tout expert sur le mouvement doit savoir ce qu'est une valeur propre et ce qu'est

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

un vecteur propre.

Pour toute transformation linéaire T, les vecteurs spéciaux ψ qui se transforment en des multiples d'eux-mêmes,

$$T\psi = \lambda\psi \tag{32}$$

s'appellent des *vecteurs propres* (ou encore des *états propres*), et le facteur de multiplication λ s'appelle la *valeur propre* associée. Les expériences montrent que

▷ L'état du système *après* une mesure est donné par le vecteur propre correspondant à la valeur propre mesurée.

En ce qui concerne l'expérience de Stern et Gerlach, les états propres sont les états «up» et «down». En général, les états propres sont les états qui ne changent pas lorsque l'on mesure la variable correspondante. Les valeurs propres des opérateurs hermitiens sont toujours réelles, de sorte que la cohérence est assurée: tous les résultats de mesures sont des nombres réels.

En résumé, le quantum d'action nous oblige à faire la distinction entre trois concepts qui sont confondus en physique classique: l'*état* d'un système, une *mesure* sur le système et le *résultat de la mesure*. Le quantum d'action nous oblige à modifier le vocabulaire avec lequel nous décrivons la nature, et nous oblige à utiliser des concepts plus différenciés. Maintenant, nous arrivons à l'étape principale: la description du *mouvement* à l'aide de ces concepts. C'est ce que l'on appelle habituellement la «théorie quantique».

Visualiser la fonction d'onde: les flèches tournantes et les nuages de probabilité

Nous venons juste de décrire l'état d'un quanton par une flèche. En fait, ceci est une approximation dans le cas des quantons localisés. Plus précisément:

▷ L'état d'une particule quantique est décrit par une distribution spatiale de flèches, que l'on appelle la *fonction d'onde*.

Pour développer une image visuelle de la fonction d'onde, nous commençons par nous imaginer une particule quantique qui est localisée, autant que possible. Dans ce cas, la fonction d'onde d'un quanton libre peut être décrite simplement par une seule *flèche tournante*.

Les expériences montrent que lorsqu'un quanton *localisé* voyage dans l'espace, la flèche qui lui est attachée tourne. Si la particule n'est pas relativiste et si on peut négliger son spin, la rotation se produit dans un plan perpendiculaire à la direction du mouvement. Le bout de la flèche décrit donc une *hélice* autour de la direction du mouvement. Dans ce cas, l'état à un instant donné est décrit par l'angle de la flèche. Cet angle est la *phase quantique*. La phase quantique est responsable des propriétés ondulatoires de la matière, comme nous allons le voir. La longueur d'onde et la fréquence de l'hélice sont déterminées par la quantité de mouvement et l'énergie cinétique de la particule.

Si la particule n'est *pas localisée* (mais toujours non relativiste et toujours avec des effets de spin négligeables) l'état (la fonction d'onde) définit une flèche tournante *en*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

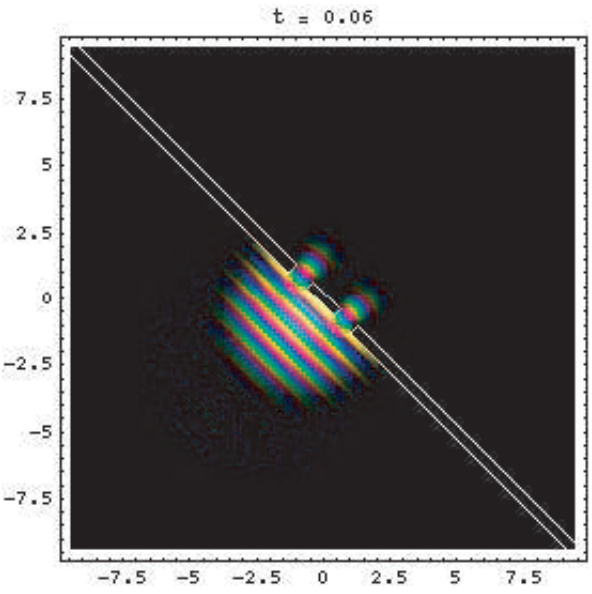


FIGURE 44 Le mouvement d'une fonction d'onde (ou état quantique) passant à travers deux fentes, montrant en même temps les propriétés particulaires et ondulatoires de la matière. La densité de l'état, lié à la longueur de la flèche, est représentée par la luminosité, et la phase locale est codée par la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

chaque point de l'espace. La rotation se produit encore dans un plan perpendiculaire à la direction du mouvement, mais dans ce cas, nous avons une distribution de flèches qui tracent toutes des hélices parallèles à la direction du mouvement. En tout point de l'espace et du temps, l'état a une phase quantique et une longueur de flèche. Les longueurs des flèches diminuent lorsque l'on s'éloigne à l'infini dans l'espace.

La Figure 44 montre un exemple de l'évolution d'une fonction d'onde pour des particules non relativistes avec des effets de spin négligeables. La direction de la flèche en chaque point est indiquée par la couleur en ce point. La longueur de la flèche est indiquée par la luminosité de la couleur. Pour des particules non relativistes ayant des effets de spin négligeables, la fonction d'onde $\psi(t, x)$ est donc décrite par une longueur et une phase: c'est un nombre *complexe* en chaque point de l'espace. La phase est essentielle pour les interférences et pour de nombreux autres effets ondulatoires. Quelle propriété mesurable est décrite par l'amplitude (ou longueur) de la flèche locale? La réponse a été donnée par le célèbre physicien Max Born:

Page 254

▷ L'amplitude de la fonction d'onde est une *amplitude de probabilité*. Le carré de l'amplitude, c.-à-d. la grandeur $|\psi(t, x)|^2$, donne la probabilité de trouver la particule à la position x et à l'instant t.

Autrement dit, une fonction d'onde est la combinaison de deux idées: d'une part, une fonction d'onde est un *nuage*, et de l'autre, en chaque point du nuage il faut s'imaginer une flèche. Avec le temps, les flèches tournent et le nuage change de forme.

▷ Une fonction d'onde est un nuage de flèches tournantes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Décrire l'état d'une particule matérielle à l'aide d'un nuage de flèches tournantes est l'étape essentielle pour se représenter les propriétés ondulatoires de la matière.

Nous pouvons clarifier la situation davantage:

▷ Dans tous les processus pour lesquels la phase de la fonction d'onde n'est pas importante, la représentation de la fonction d'onde par un nuage est suffisante et correcte.

Par exemple, le mouvement des atomes ou des molécules dans les gaz ou les liquides peut être visualisé par le mouvement d'objets nuageux. Il faut souligner que les nuages en question sont assez durs: il faut beaucoup d'énergie pour déformer les nuages atomiques. La dureté d'un cristal typique résulte directement de la dureté des nuages atomiques que l'on trouve à l'intérieur. Les atomes sont des nuages extrêmement rigides et durs.

D'autre part,

▷ Dans tous les processus pour lesquels la phase de la fonction d'onde joue un rôle, la représentation de la fonction d'onde par un nuage doit être étendue en ajoutant des flèches tournantes en chacun des points.

C'est le cas pour les processus d'interférences de quantons, mais également pour la description précise des liaisons chimiques.

Les enseignants discutent souvent du meilleur moyen pour expliquer les fonctions d'ondes. Certains préfèrent utiliser uniquement le modèle du nuage, d'autres préfèrent ne pas utiliser de visualisation du tout. Les deux approches sont possibles, mais le moyen le plus utile et le plus pratique est d'imaginer l'état (la fonction d'onde) d'une particule quantique *non relativiste* comme une flèche en tout point de l'espace. La fréquence de rotation de l'ensemble des flèches est l'*énergie cinétique* de la particule. La longueur d'onde du mouvement des flèches (la période de la courbe hélicoïdale que la pointe des flèches, ou celle de la flèche moyenne, trace au cours du mouvement) est la *quantité de mouvement* de la particule quantique.

Une flèche en chaque point de l'espace est un *champ* (mathématique). Le champ est concentré dans la région où se situe la particule, et l'amplitude du champ est liée à la probabilité de trouver la particule. Donc, le champ de l'état (la fonction d'onde ou la fonction d'état) est un *nuage de flèches*, que l'on désigne habituellement en utilisant la lettre grecque ψ.

Notez que, bien que la fonction d'onde puisse être vue comme définissant une flèche en chaque point de l'espace, elle peut également être décrite, dans son ensemble, comme un vecteur unique, cette fois-ci dans un espace!de Hilbert. Pour des particules libres, c.-à-d. des particules qui ne sont pas soumises à des forces externes, l'espace de Hilbert est de dimension infinie! Néanmoins, il n'est pas difficile de faire des calculs dans de tels espaces. Le produit scalaire de deux fonctions d'onde est l'intégrale spatiale du produit du complexe conjugué de la première fonction et du complexe (non conjugué) de la deuxième fonction. Avec cette définition, tous les concepts sur les vecteurs (vecteurs unitaires, vecteurs nuls, vecteurs de base, etc.) peuvent être appliqués de manière significative aux fonctions d'ondes.

Page 267

Défi 69 f

En résumé, pour des particules non relativistes et sans effets de spin, *l'état (la fonc-*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tion d'onde) d'une particule quantique est un nuage (une onde distribuée) de flèches tournantes. Cet aspect d'un nuage quantique est inhabituel. Puisqu'un nuage quantique est constitué de petites flèches, chaque point du nuage est décrit par une densité locale et une orientation locale. Cette dernière propriété n'apparaît dans aucun des nuages de la vie quotidienne.

Pendant de nombreuses décennies, il a été tacitement supposé qu'une fonction d'onde ne pouvait pas être visualisée plus simplement que par un nuage de flèches tournantes. Ce n'est seulement que depuis ces dernières années que l'on a montré qu'il existait d'autres visualisations possibles pour de tels nuages quantiques. Une visualisation possible sera présentée dans le dernier volume de cette série.

Vol. VI, page 174

L'évolution de l'état – l'équation de Schrödinger

La description de l'état d'un quanton non relativiste et dont les effets de spin sont négligeables à l'aide d'un nuage tournant sur lui-même, détermine *complètement* comment la fonction d'onde évolue dans le temps. En effet, pour de telles particules quantiques, l'évolution découle de l'énergie totale (la somme des énergies cinétique et potentielles $T + V$) et des propriétés des ondes de matière:

▷ Le taux de changement local de la flèche (ou des flèches) de l'état $\psi(x)$ (ou tout simplement ψ) est généré par l'énergie totale locale (l'hamiltonien) $H = T + V$:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi \,. \tag{33}$$

Cette équation célèbre est l'*équation du mouvement de Schrödinger*.* Cette *équation d'évolution* s'applique à tous les systèmes quantiques et elle est l'un des points culminants de la physique moderne.

Ref. 55
Ref. 56
En fait, Erwin Schrödinger avait trouvé son équation de deux manières différentes. Dans son premier article il la déduisait à partir du principe variationnel. Dans son deuxième article, il déduisait l'équation d'évolution directement, en se posant une question simple: comment l'état évolue-t-il? Il savait que l'état d'un quanton se comportait à la fois comme une onde et comme une particule. Une onde est décrite par un champ, qu'il désigna $\psi(t, x)$. Si l'état ψ se comporte comme une onde, alors la fonction d'onde correspondante doit être une amplitude W multipliée par un facteur de phase $e^{i\boldsymbol{kx}-\omega t}$. L'état peut alors s'écrire

$$\psi(t, x) = W(t, x)\, e^{i\boldsymbol{kx}-\omega t} \,. \tag{34}$$

L'amplitude W est la *longueur* de la flèche locale, et la phase est son *orientation*. De ma-

* Erwin Schrödinger (Vienne, 1887 – Vienne, 1961) était célèbre pour être un *physicien bohémien*, vivant toujours en ménage avec deux femmes. En 1925, il découvrit l'équation qui lui apporta une renommée internationale et le prix Nobel de physique en 1933. Il fut également le premier à montrer que le rayonnement découvert par Victor Hess à Vienne provenait en effet du cosmos. Il quitta l'Allemagne, puis à nouveau l'Autriche, par aversion pour le national-socialisme, et il est resté professeur à Dublin durant de nombreuses années. C'est là qu'il publia sont livre célèbre et influent *Qu'est-ce que la vie?*. Dans ce livre, il était tout proche de prédire l'acide nucléique ADN (inconnu à l'époque) uniquement par une approche théorique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 45 Erwin Schrödinger (1887 – 1961).

nière équivalente, l'amplitude est la densité locale du nuage, et la phase est l'orientation locale du nuage.

Nous savons que l'onde quantique doit aussi se comporter comme une particule de masse m. En particulier, la relation non relativiste entre l'énergie et la quantité de mouvement $E = \boldsymbol{p}^2/2m + V(\boldsymbol{x})$ (où $V(\boldsymbol{x})$ est le potentiel au point $\boldsymbol{x}$) doit être satisfaite pour ces ondes. Les deux relations de de Broglie (22) pour la longueur d'onde de la matière et
Page 84 pour sa fréquence impliquent alors

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi = \frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(\boldsymbol{x})\psi \,. \tag{35}$$

Ceci est la forme complète de l'équation d'onde de Schrödinger. L'opérateur ∇^2 est le laplacien, essentiellement la dérivée seconde sur l'espace. L'équation établit comment l'onde de flèches (la fonction d'onde ψ associée à une particule) évolue au cours du temps. En 1926, cette *équation d'onde* pour le champ complexe ψ est devenue célèbre instantanément lorsque Schrödinger l'utilisa, en y introduisant le potentiel ressenti par un électron proche d'un proton, pour calculer les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. Dans un atome d'hydrogène, la lumière est émise par l'unique électron à l'intérieur de l'atome. Ainsi, une description précise du mouvement de l'électron au sein de l'atome d'hydrogène nous permet de décrire les fréquences lumineuses que l'atome peut émettre. (Nous ferons les calculs et la comparaison avec l'expérience plus loin.)
Page 206 Tout d'abord, l'équation de Schrödinger expliquait que seul des couleurs *discrètes* étaient émises par l'hydrogène. De plus, les fréquences de la lumière émise se trouvaient être en accord avec les prédictions de l'équation avec cinq chiffres significatifs. Finalement, la taille des atomes était prédite correctement. Ces résultats étaient très importants, tout particulièrement si on garde à l'esprit que la physique classique ne peut même pas expliquer l'existence des atomes, sans même parler de la lumière qu'ils émettent! En revanche, la physique quantique explique toutes les propriétés des atomes ainsi que leurs couleurs avec une très bonne précision. Autrement dit, la découverte du quantum d'action a conduit la description du mouvement de la matière vers un nouveau sommet.

En fait, on ne peut arriver à une description exacte des quantons de matière que lorsque les *effets de spin* et la relation d'énergie-impulsion *relativiste* sont tous deux pris
Page 213 en compte, ce que nous ferons plus loin. Aucun écart entre les calculs relativistes com-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

plets et les expériences n'a jamais été trouvé. Et même aujourd'hui, les prédictions et les mesures des spectres atomiques restent les plus précises et les plus exactes de tous les domaines de l'étude de la nature: dans les cas pour lesquels la précision expérimentale le permet, les valeurs calculées sont en accord avec les expériences jusqu'à 13 chiffres significatifs.

L'AUTO-INTERFÉRENCE DES QUANTONS

Page 86 Les ondes interfèrent. Toutes les expériences, y compris les exemples de la Figure 38 et de la Figure 39, confirment que toutes les particules quantiques, et en particulier tous les quantons de matière, produisent des interférences. Les interférences sont une conséquence directe de l'équation de Schrödinger, comme le montre le film de la Figure 44. Le film illustre la solution de l'équation de Schrödinger pour une particule quantique passant à travers deux fentes. Le film visualise comment deux fentes induisent de la diffraction et des interférences pour une particule de matière.

Page 101

Il se trouve que l'équation de Schrödinger reproduit et explique complètement les observations d'interférences de la matière: les interférences de quantons de matière sont également dues à l'évolution de nuages de flèches tournantes. Et comme dans tous les phénomènes d'interférences, l'intensité locale de la figure d'interférence se trouve être proportionnelle au carré $|W|^2$ de l'amplitude locale de l'onde. Et l'amplitude locale de l'onde résulte de la phase des trains d'ondes qui interfèrent. L'analogie avec les interférences lumineuses est totale, même les formules sont identiques.

On notera que bien que la fonction d'onde soit répartie sur l'ensemble de l'écran de détection juste avant qu'elle ne le frappe, elle ne produit pour autant qu'une tache localisée sur l'écran. Cet effet, que l'on appelle l'*effondrement de la fonction d'onde*, est exploré en détails dans ce qui suit.

Page 173

LA VITESSE DES QUANTONS

Approfondissons un peu les détails de la description que donne l'équation de Schrödinger (35). L'équation exprime une relation simple: la vitesse classique d'une particule matérielle est la *vitesse de groupe* de la fonction d'onde ψ. Vue depuis une grande distance, la fonction d'onde se déplace donc comme le ferait une particule *classique*.

Mais la physique classique nous a appris que la vitesse de groupe n'était pas toujours bien définie: dans les cas pour lesquels le groupe se dissout en plusieurs pics, le concept de vitesse de groupe n'est pas d'une grande utilité. Ces cas sont également ceux pour lesquels le mouvement quantique est très différent du mouvement classique, comme nous allons le découvrir bientôt. Mais pour les cas bien élevés, telles que les particules libres ou presque libres, il apparaît que la fonction d'onde se déplace de la même façon que le ferait une particule classique.

Page 173

L'équation de Schrödinger nous renseigne sur un autre point: la vitesse et la position de la matière ne sont pas des variables indépendantes et ne peuvent pas être choisies librement. La condition initiale d'un système est donnée uniquement par la valeur initiale de la fonction d'onde. Aucune dérivée ne doit (ou ne peut) être spécifiée. En effet, les expériences confirment que les systèmes quantiques sont décrits par une équation d'évolution du *premier ordre*, un contraste frappant avec les systèmes classiques. La raison de ce contraste est le quantum d'action, et la limite qu'il impose sur les variables

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

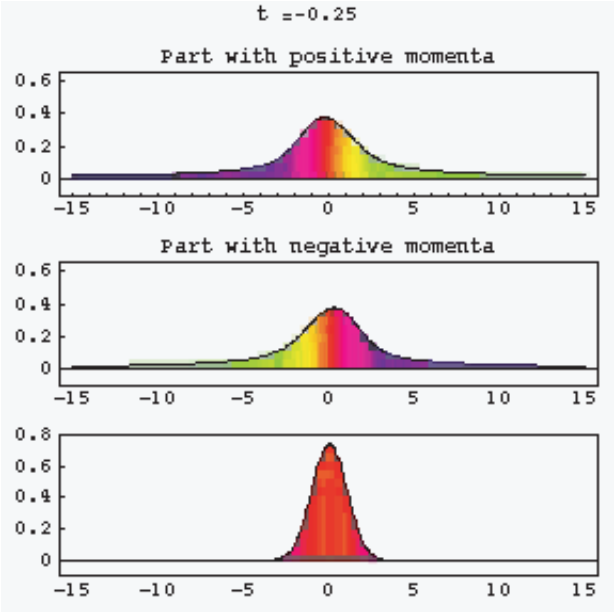


FIGURE 46 L'évolution d'une fonction d'onde (courbe du bas) avec une quantité de mouvement nulle, et le mouvement de ses parties avec des quantités de mouvement positive et négative. La phase locale est codée à l'aide de la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

d'état possibles d'une particule.

L'ÉTALEMENT DES QUANTONS

Pour des particules quantiques libres, l'équation d'évolution de Schrödinger implique de la *dispersion*, comme l'illustre la Figure 46. Imaginez une fonction d'onde qui se trouve localisée autour d'une position de départ donnée. Une telle fonction d'onde décrit un système quantique au repos. Avec le temps, cette fonction d'onde va *s'étaler* dans l'espace. En effet, l'équation d'évolution de Schrödinger est similaire, sur le plan mathématique, à une équation de diffusion. De la même façon qu'une goutte d'encre dans l'eau va se répandre, l'état d'une particule quantique localisée va également s'étaler dans l'espace. Il est vrai que la position la plus probable reste inchangée, mais la probabilité de trouver la particule à une grande distance de la position de départ augmente avec le temps. En ce qui concerne les particules quantiques, l'effet d'étalement est effectivement observé lors de toutes les expériences. L'étalement est une conséquence de l'aspect ondulatoire de la matière, et donc du quantum d'action $\hbar$. Il se produit pour les quantons au repos, et donc également pour les quantons en mouvement. Cependant, dans le cas des objets macroscopiques, l'effet d'étalement n'est pas observé: les voitures s'éloignent rarement de leur place de parking. En effet, la théorie quantique prédit que pour les objets macroscopiques, l'effet d'étalement est très petit, au point d'être négligeable. Pouvez-vous montrer pourquoi?

Défi 70 f

Défi 71 pe

Pour résumer, l'aspect ondulatoire de la matière conduit à l'étalement des fonctions d'ondes. Les fonctions d'ondes manifestent de la dispersion.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

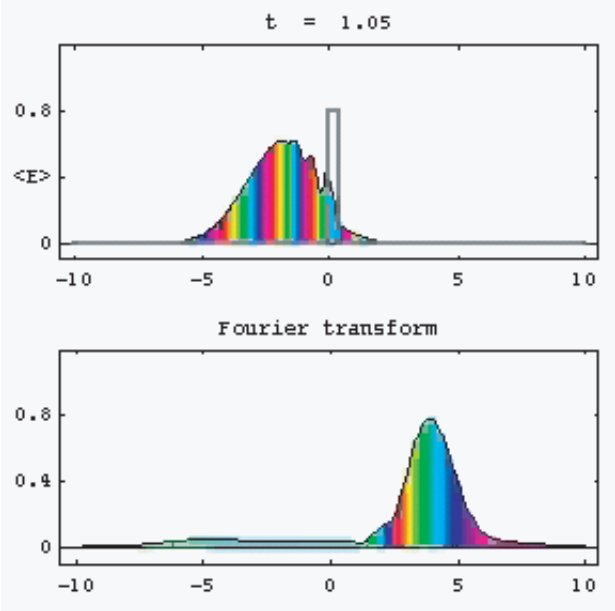


FIGURE 47 Le passage d'une fonction d'onde à travers une barrière de potentiel (la colonne rectangulaire) par effet tunnel: la plus grande partie de la fonction d'onde est réfléchie, alors qu'une partie passe de l'autre côté. La phase locale est codée à l'aide de la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller

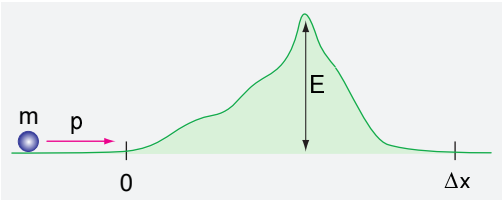


FIGURE 48 Gravir une colline.

L'EFFET TUNNEL ET LES LIMITES DE LA MÉMOIRE – L'AMORTISSEMENT DES QUANTONS

Notre «bon sens» nous dit qu'une balle trop lente ne peut pas passer par-dessus une colline trop haute. Plus précisément, la physique classique nous dit que si l'énergie cinétique T est plus petite que l'énergie potentielle V que la balle aurait au sommet de la colline, alors la balle ne peut pas atteindre le sommet de la colline. En revanche, d'après la théorie quantique, il y a une probabilité non nulle de passer par-dessus la colline, et cela *quel que soit* l'énergie de la balle.

En théorie quantique, les collines et les obstacles sont décrits par des barrières de potentiel, et les objets par des fonctions d'onde. N'importe quelle fonction d'onde initiale s'étalera *au-delà* de n'importe quelle barrière de potentiel de hauteur et de largeur finies. De même, la fonction d'onde ne s'annulera pas *à* l'endroit où se trouve la barrière. En bref, n'importe quel objet peut surmonter n'importe quelle colline ou barrière, comme le montre la Figure 48. Cet effet s'appelle l'*effet tunnel*. Il contraste franchement avec l'expérience quotidienne (et avec la mécanique classique).

L'effet tunnel résulte d'un nouvel aspect faisant partie de la description quantique des collines: dans la nature, tout obstacle peut se surmonter avec un effort *fini*. Aucun

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

obstacle n'est infiniment difficile à franchir. En effet, ce n'est qu'en cas de potentiel de hauteur infinie que la fonction d'onde s'annulerait et qu'elle ne pourrait pas s'étaler de l'autre côté. Mais de tels potentiels n'existent qu'en tant qu'approximations: dans la nature, les potentiels ont toujours une valeur finie.

Défi 72 pe Quelle est l'ampleur de l'effet tunnel? Le calcul montre que la probabilité de transmission P est donnée approximativement par

$$P \approx \frac{16T(V-T)}{V^2} \; \mathrm{e}^{-\frac{2w}{\hbar}\sqrt{2m(V-T)}} \tag{36}$$

où w est la largeur de la colline, V sa hauteur, et m et T la masse et l'énergie cinétique de la particule. Pour un système comportant un grand nombre de particules, la probabilité est (au plus) le produit des probabilités des différentes particules.

Prenons le cas d'une voiture dans un garage, et supposons que la voiture soit composée de 10^{28} atomes à température ambiante. L'épaisseur typique d'un mur de garage est de 0, 1 m et sa hauteur de potentiel typique est $V = 1\,\mathrm{keV} = 160\,\mathrm{aJ}$ pour qu'un atome puisse passer à travers. Nous obtenons que la probabilité de trouver la voiture à l'extérieur du garage est

$$P \approx \left(10^{-(10^{12})}\right)^{(10^{28})} \approx 10^{-(10^{40})} \,. \tag{37}$$

Cette valeur est tellement petite (essayez simplement de l'écrire pour vous en Défi 73 f convaincre), qu'elle n'est jamais prise en compte par la police lorsqu'une voiture est rapportée disparue. (En fait, la probabilité est même considérablement plus petite. Défi 74 e Pouvez-vous citer au moins un effet qui a été oublié dans ce calcul simple?)

De toute évidence, l'effet tunnel ne peut être important que pour des petits systèmes, constitués de quelques particules, et pour des barrières minces, d'une épaisseur de l'ordre de $\hbar/\sqrt{2m(V-T)}$. Par exemple, on observe l'effet tunnel pour des atomes individuels dans les solides à haute température, mais il n'est pas important dans la vie quotidienne. Pour les électrons, l'effet est plus prononcé: la largeur de la barrière w pour que l'effet tunnel soit appréciable est

$$w \approx \frac{0,5\,\mathrm{nm}\,\sqrt{\mathrm{aJ}}}{\sqrt{V-T}} \,. \tag{38}$$

À température ambiante, l'énergie cinétique T est de l'ordre de 6 zJ. Une augmentation de la température augmente bien évidement l'effet tunnel. Par conséquent, les électrons traversent assez facilement par effet tunnel des barrières qui sont larges de quelques atomes. En effet, tous les tubes de télévision utilisent l'effet tunnel à haute température pour générer le faisceau d'électrons qui produit l'image. La nécessité du chauffage est la raison pour laquelle, par le passé, les tubes de télévision prenaient un certain temps pour se mettre en route.

L'effet tunnel des électrons limite également la taille physique de la mémoire des ordinateurs. Les puces de mémoire ne peuvent pas être arbitrairement petites. Des circuits intégrés en silicone d'un téraoctet de mémoire vive (ou RAM pour «random access me-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

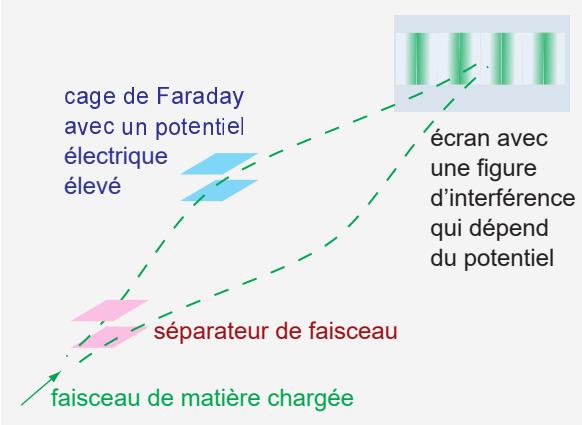


FIGURE 49 Un potentiel électrique localisé, placé dans un interféromètre, conduit à un décalage de la figure d'interférence.

Défi 75 e

mory» [N.d.T.]) n'existeront sans doute jamais. Pouvez-vous imaginer pourquoi? En fait, l'effet tunnel limite le fonctionnement de n'importe quelle mémoire, y compris celle de notre cerveau. En particulier, si nous avions une température bien plus élevée que 37 °C, nous ne nous souviendrions de rien!

Puisque la lumière est constituée de particule, elle peut également passer à travers les barrières de potentiel par effet tunnel. Les meilleurs (les plus hautes) barrières de potentiel pour la lumière sont les miroirs, qui ont des hauteurs de barrières de l'ordre d'un attojoule. L'effet tunnel implique que la lumière *peut* être détectée derrière n'importe quel miroir. On a en effet détecté ce que l'on appelle des ondes évanescentes, qui sont utilisées dans diverses appareils et expériences de haute précision.

La phase quantique

Nous avons vu que l'*amplitude* de la fonction d'onde (l'amplitude de probabilité) montre les mêmes effets que n'importe quelle onde: étalement et amortissement. Nous retournons maintenant vers la *phase* de la fonction d'onde et l'explorons plus en détails.

Alors que l'amplitude d'une fonction d'onde est facile à se représenter (pensez simplement à la densité d'un nuage réel, ou plus exactement à sa racine carrée) sa phase nécessite un peu plus d'efforts. Comme nous l'avons mentionné, les états (les fonctions d'onde) sont des *nuages ayant une phase locale*: ce sont des nuages de flèches tournantes, c.-à-d. des nuages d'objets qui tournent et peuvent être tournés. Dans le cas du nuage atmosphériques quotidien, une rotation locale des gouttelettes sur elles-mêmes n'a aucun effet sur le nuage. En revanche, en théorie quantique, la rotation locale du nuage, et donc le changement local de sa phase, a bien un effet mesurable. Explorons ce point.

Page 63

La phase des ondes de matière libre se comporte comme la phase des photons: elle évolue avec le temps, et donc, elle augmente le long du parcours d'une particule en mouvement. On peut se représenter la phase par une petite flèche tournante. La vitesse angulaire (que l'on appelle la pulsation [N.d.T.]) avec laquelle la phase tourne est donnée par la relation célèbre $\omega = E/\hbar$. En bref,

▷ On peut se représenter la fonction d'onde d'une particule quantique libre

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

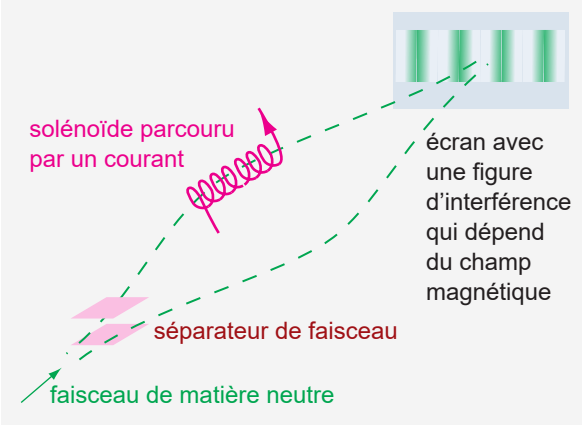


FIGURE 50 Les champs magnétiques modifient la phase d'une particule tournant sur elle-même.

par un nuage de flèches qui se déplace. Les flèches tournent à une fréquence constante alors que pendant ce temps, le nuage s'étale.

Par-dessus tout, la phase est l'aspect de la fonction d'onde qui conduit aux effets d'interférences. Lorsque deux fonctions d'ondes partielles sont séparées puis recombinées après un changement de phase relative, c'est le changement de phase qui déterminera la figure d'interférence. Ceci est à l'origine des observations d'interférences des faisceaux d'électrons que l'on voit sur la Figure 38. Sans la phase quantique, il n'y aurait pas d'atténuation et pas d'interférence.

La phase d'une fonction d'onde peut être influencée de nombreuses façons. Le moyen le plus simple est d'utiliser des champs électriques. Si la fonction d'onde d'une particule *chargée* est divisée en deux, et qu'une des parties est dirigée à travers une région où règne un champ électrique, un changement de phase va se produire. Le montage est présenté sur la Figure 49. Un changement périodique du potentiel électrique devrait conduire à un décalage périodique de la figure d'interférence. C'est en effet ce que l'on observe.

Un autre cas simple de manipulation de phase est présenté sur la Figure 50: un champ magnétique modifie également la phase d'une particule neutre tournant sur elle-même et contenant une distribution de charges. Il influence donc le comportement des interférences.

Ref. 57 Une expérience célèbre montre l'importance de la phase d'une façon encore plus surprenante: l'*effet Aharonov-Bohm*. L'effet est célèbre pour deux raisons: il est contre-intuitif et il a été prédit avant d'être observé. Regardez l'appareillage présenté sur la Figure 51. Une onde de matière de particules chargées est divisée en deux par un cylindre (positionné à angle droit par rapport à la trajectoire de la matière) et l'onde de matière se recombine derrière lui. À l'intérieur du cylindre se trouve un champ magnétique, alors qu'il n'y en a pas à l'extérieur. (Un moyen simple pour produire un tel cylindre est d'utiliser un solénoïde long.) La physique quantique prédit que l'on observera une figure d'interférence, et que la position des franges dépendra de la valeur du champ magnétique. Ceci se produit malgré le fait que l'onde n'entre jamais dans la région où se trouve le champ! Cet effet surprenant a été observé lors d'innombrables expériences.

L'explication de l'effet Aharonov-Bohm est simple: pour une particule chargée, la

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

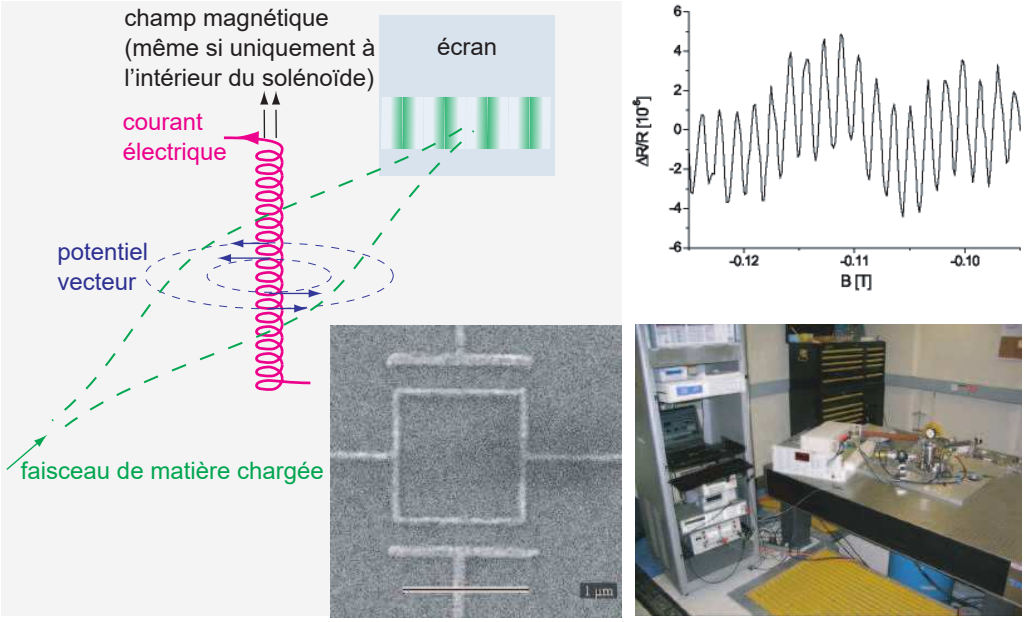


FIGURE 51 L'effet Aharonov-Bohm: l'influence du potentiel vecteur magnétique sur les interférences (à gauche) et une confirmation par la mesure (à droite), en utilisant un échantillon microscopique transportant des électrons dans des fils métalliques fins. (© Doru Cuturela)

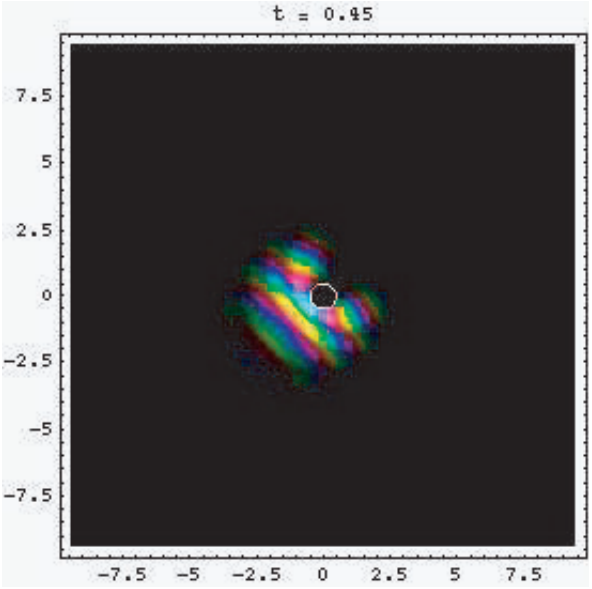


FIGURE 52 Le mouvement d'une fonction d'onde autour d'un solénoïde, montrant l'effet Aharonov-Bohm. La densité de l'état est représentée par la luminosité, et la phase locale est codée par la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

phase d'une fonction d'onde est déterminée par le potentiel vecteur $\boldsymbol{A}$, et non pas par le champ magnétique $\boldsymbol{B}$. Le potentiel vecteur ne s'annule pas autour d'un solénoïde (comme on l'a vu dans la section sur l'électrodynamiques) mais circule autour. Cette

Vol. III, page 83

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

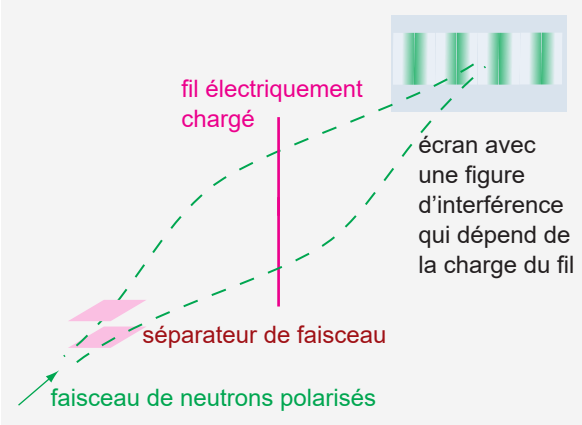


FIGURE 53 L'effet Aharonov-Casher: l'influence d'une charge sur la phase conduit à des interférences même lorsque ce sont des neutrons qui interfèrent.

circulation différencie les deux côtés du solénoïde et conduit à un décalage de phase (qui dépend en effet de la valeur du champ magnétique) pour produire ensuite des interférences, et ceci bien que la particule n'interagisse jamais avec le champ magnétique lui-même.

Un autre exemple de manipulation de phase est l'*effet Aharonov-Casher*, qui se produit même pour des particules neutres, pour autant qu'elles aient un moment magnétique, comme c'est le cas des neutrons. La phase d'un neutron *polarisé* va être influencée par un champ électrique, de sorte que le montage de la Figure 53 produira une figure d'interférences qui dépend du potentiel électrique que l'on applique.

Un autre cas de manipulation de phase sera présenté plus loin: les champs de gravitation peuvent également être utilisés pour faire tourner les fonctions d'ondes. Même l'accélération due à un mouvement de rotation est capable de le faire. En fait, il a été possible de mesurer la rotation de la Terre en observant le changement de la figure d'interférence d'un faisceau de neutrons. Ref. 58

Une autre catégorie d'expériences importantes qui manipulent la phase des fonctions d'ondes est possible en utilisant des phénomènes quantiques macroscopiques. En supraconductivité et en superfluidité, la phase de la fonction d'onde est régulièrement manipulée à l'aide de champs magnétiques et de champs électriques. Cette possibilité a de nombreuses applications techniques importantes. Par exemple, ce que l'on appelle l'*effet Josephson* est utilisé pour mesurer des différences de potentiels électriques en mesurant la fréquence des ondes radio émises. De même, ce que l'on appelle les *dispositifs supraconducteurs à interférence quantique* (ou DSIQ) sont utilisés pour mesurer des champs magnétiques minuscules.

Nous noterons que toutes ces expériences confirment qu'il n'est *pas possible* de mesurer la phase *absolue* d'une fonction d'onde. Cependant, il *est possible* de mesurer les *phases relatives* (les différences de phases ou les changements de phases). Pouvez-vous le confirmer? Défi 76 f

Tous les effets de décalage de phase que nous venons de présenter ont été observés au cours de nombreuses expériences. La phase est un aspect essentiel de la fonction d'onde: c'est sa phase qui conduit aux interférences, et en tout premier lieu, elle est la raison principale pour lui avoir donner son nom de fonction d'*onde*. Comme pour n'importe quelle

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

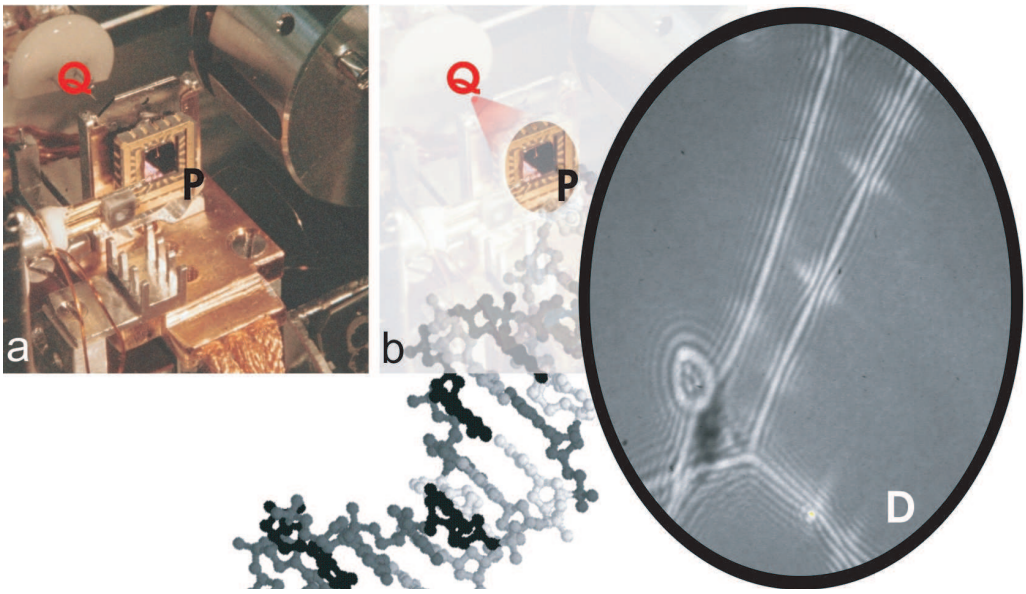


FIGURE 54 Un hologramme électronique de molécules d'ADN. (© Hans-Werner Fink/Wiley VCH)

onde, la phase évolue au cours du temps et elle peut être affectée par différentes influences extérieures. Par-dessus tout, les expériences montrent que l'on se fait une meilleure idée d'une particule quantique localisée (une pour laquelle l'étalement de la fonction d'onde peut être négligée) en se l'imaginant comme une flèche tournante. En revanche, chaque fois que l'étalement ne peut pas être négligée, on se fait une meilleure idée de la fonction d'onde en se l'imaginant comme une onde de flèches tournantes placées en chaque point de l'espace.

Deux faisceaux d'électrons peuvent-ils interférer? Y a-t-il des faisceaux d'électrons cohérents?

Existe-t-il des sources d'électrons cohérentes? La question est délicate. Certains résultats dans la littérature, tels que celui qu'illustre la Figure 54, établissent qu'il est possible de faire des hologrammes avec des faisceaux d'électrons.* Cependant, lorsque l'on demande à leurs auteurs ce qu'ils entendent par cohérence, ils répondent que la cohérence des électrons n'est que transversale, mais pas longitudinale. La cohérence transversale est déterminée par la taille possible des fronts d'onde ayant une phase donnée. La limite supérieure de cette taille est donnée par les interactions d'un tel état avec son environnement. Ce comportement est tel que l'on peut s'y attendre pour le cas d'une cohérence réelle.

Ref. 59

Cependant, le concept de «cohérence transversale» est inapproprié. La capacité à interférer avec soi-même, telle qu'on le sous-entend par le terme «cohérence transversale», n'est pas la définition correcte de la cohérence. La cohérence transversale, qu'elle soit pour des photons ou pour des particules de matière, exprime seulement la petitesse de la source de particules. Les petites lampes et les lasers permettent de produire des inter-

Ref. 60

* Les premiers hologrammes utilisant des faisceaux de neutrons ont été produits en 2002.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

férences lorsque le faisceau est divisé puis recombiné avec une longueur de trajectoire identique, et ceci n'est pas une preuve de la cohérence du champ lumineux. Un raisonnement similaire montre que la monochromaticité n'est pas non plus une preuve de cohérence.

Un état est dit *cohérent* s'il possède une phase bien définie en tous points d'un domaine donné d'espace ou de temps. La taille de la région spatiale ou de l'intervalle de temps défini le degré de cohérence. Cette définition conduit à des longueurs de cohérence de l'ordre de la taille de la source pour des petites sources «incohérentes». Même pour une petite longueur de cohérence, la taille d'une figure d'interférence (la distance d entre ses maximums) peut être bien plus grande que la longueur de cohérence l ou que la taille de la source s. En bref, la grande taille (ou la durée persistante dans le temps) d'une figure d'interférence n'est *pas* une preuve de cohérence en elle-même.

Rappelons la situation dans le cas de la lumière. Une source de lumière est cohérente si elle produit une onde sinusoïdale approximative sur une certaine distance ou au cours d'une certaine durée. À cause de la relation d'indétermination, dans n'importe quel faisceau de lumière cohérente, le nombre de photons est indéterminé. La même exigence s'applique aux faisceaux d'électrons cohérents: la cohérence nécessite que le nombre d'électrons soit indéterminé. Ceci n'est pas possible parce que les électrons transportent une charge qui se conserve. Les faisceaux d'électrons cohérents n'existent pas.

Page 52

En résumé, bien qu'un électron soit capable d'interférer avec lui-même, et bien qu'il soit possible de produire des interférences entre deux sources lumineuses, les interférences entre deux sources d'électrons sont impossibles. Et effectivement, personne n'a jamais réussi à produire des interférences entre deux sources d'électrons. Il n'y a pas de concept de cohérence, au sens conventionnel, pour les faisceaux d'électrons.

Le principe de moindre action en physique quantique

Dans la nature, le mouvement se produit d'un façon qui minimise le changement. En effet, en physique classique, le principe de moindre action (le principe de la paresse cosmique) établit que: dans la nature, le mouvement d'une particule se produit le long du chemin particulier (parmi tous les chemins possibles ayant les mêmes extrémités) pour lequel l'action est minimale. Ce principe de la paresse cosmique (ou de l'efficacité cosmique) a été établi mathématiquement en disant que dans la nature, la *variation* δS de l'action était nulle. La minimisation de l'action (du changement) explique toutes les équations d'évolution classiques. Nous transposons maintenant cette idée au domaine quantique.

Vol. I, page 253

Pour les systèmes quantiques, nous avons besoin de redéfinir à la fois le concept d'action et le concept de variation. Premièrement, il nous faut trouver une description de l'action qui soit basée sur des opérateurs. Deuxièmement, il nous faut définir la variation de l'action sans utiliser les chemins, parce que le concept de «chemin» n'existe pas pour les systèmes quantiques. Troisièmement, puisqu'il y a une action minimale dans la nature, la minimisation d'une variation n'est pas un concept clairement défini, et nous devons surmonter cet obstacle. Il existe deux façons principales pour atteindre cet objectif: on peut décrire le mouvement d'un système quantique comme une superposition de tous les chemins possibles, ou encore, on peut décrire l'action avec l'aide de fonctions d'ondes. Les deux approches sont équivalentes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Avec la première approche, la *formulation de l'intégrale de chemin*, le mouvement d'une particule quantique est décrit comme une superposition démocratique des mouvements le long de tous les chemins possibles. (Plus haut, nous avons appelé cette approche le «modèle des flèches».) Le long de chaque chemin, l'évolution de la flèche est déterminée, puis, au point d'arrivée, les flèches de tous les chemins sont additionnées. Pour chaque chemin, l'action est le nombre de tours que la flèche effectue le long du chemin. Le résultat de cette approche est que le chemin le long duquel la flèche a fait le plus petit nombre de tours est en général (mais pas toujours!) le chemin le plus probable. Une étude plus précise montre que les systèmes macroscopiques classiques suivent, dans tous les cas, uniquement le chemin produisant l'action la plus petite, alors que les systèmes quantiques suivent tous les chemins.

Page 63

Dans la seconde approche de la physique quantique, l'action est définie à l'aide de fonctions d'ondes. En physique classique, nous avons défini l'action (le changement) comme étant l'intégrale temporelle du lagrangien entre le point initial et le point final. Le lagrangien lui-même est défini comme étant la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. En physique quantique, la définition la plus simple est celle de l'*action quantique* que l'on doit à Julian Schwinger. Appelons l'état initial et l'état final du système ψ_i et ψ_f. L'action S entre ces deux états est définie par

Vol. I, page 248

$$S = \langle \psi_i \,|\, \int L \,\mathrm{d}t \,|\, \psi_f \rangle \;, \tag{39}$$

où L est le lagrangien (l'opérateur lagrangien pour être rigoureux). Les parenthèses en forme d'équerres représentent la «multiplication» des états et des opérateurs telle qu'elle est définie en théorie quantique.* Pour simplifier, en théorie quantique, l'action (c.-à-d. le changement qui se produit dans un système) est également l'intégrale du lagrangien. L'opérateur lagrangien L est défini de la même façon qu'en physique classique: le lagrangien $L = T - V$ est la différence entre l'opérateur énergie cinétique T et l'opérateur énergie potentielle V. La seule nouveauté est qu'en physique quantique, les *variables* quantité de mouvement et position de la physique classique sont remplacées par les *opérateurs* correspondants de la physique quantique.**

Pour transposer le concept de variation de l'action δS au domaine quantique, Julian Schwinger a introduit l'expression simple

$$\delta S = \langle \psi_i \,|\, \delta \int L \,\mathrm{d}t \,|\, \psi_f \rangle \;. \tag{40}$$

Nous n'avons pas besoin du concept de chemin dans cette expression, puisque la variation de l'action est obtenue en faisant varier des fonctions d'onde au lieu de faire varier des chemins.

* Nous ne donnerons pas les détails de la notation et des mathématiques ici. Dans leur description la plus simple, les états sont des fonctions d'ondes, les opérateurs agissent sur ces fonctions, et le produit de deux parenthèses différentes est l'intégrale du produit des fonctions sur l'espace.

** Plus précisément, il existe également une condition qui gouverne l'ordre des opérateurs dans un produit mixte, de façon à prendre en compte la non-commutativité des opérateurs. Nous n'explorerons pas cette question ici.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

La dernière exigence classique que nous devons transposer au domaine quantique est que, parce que la nature est paresseuse, la variation de l'action doit s'annuler. Cependant, dans le domaine quantique, la variation de l'action ne peut pas être nulle, puisque l'action observable minimale est le quantum d'action. Comme Julian Schwinger le découvrit, il n'y a qu'un seul moyen possible pour exprimer cette exigence de minimalité de l'action:

$$\delta S = \langle \psi_i \,|\, \delta \int L \,\mathrm{d}t \,|\, \psi_f \rangle = -i\hbar\, \delta \langle \psi_i | \psi_f \rangle \ . \tag{41}$$

Ceci est ce que l'on appelle le *principe de l'action quantique* et il décrit tous les mouvements du domaine quantique. En physique classique, le membre de droite est nul (puisque $\hbar$ est pris égale à zéro) et on retrouve alors le principe classique d'action minimale $\delta S = 0$. Mais en théorie quantiques, chaque fois que l'on tente d'obtenir des petites variations, on est confronté au quantum d'action et aux changements de phase (relative). Ceci s'exprime par le membre de droite de l'expression. Ce membre de droite est la raison pour laquelle les équations d'évolution de la fonction d'onde (l'équation de Schrödinger pour les cas non relativistes sans spin, ou l'équation de Dirac pour les cas relativiste de spin 1/2) sont valables dans la nature.

Autrement dit, tout mouvement quantique (c.-à-d. l'évolution quantique d'un état ψ ou $|\psi\rangle$), se produit de telle façon que la variation de l'action soit égale à $-i$ multiplié par le quantum d'action $\hbar$, multiplié par la variation du produit scalaire entre l'état initial et l'état final. En termes simples, dans le mouvement réel, les états intermédiaires sont fixés par l'exigence qu'ils doivent conduire de l'état initial à l'état final avec le plus petit nombre de tours effectifs de la phase d'état. Le facteur $-i$ exprime que l'action dépend de la rotation de la fonction d'onde.

En résumé, le principe de moindre action est également valable en physique quantique, à condition de prendre en compte qu'il n'est pas possible de trouver des valeurs d'action plus petites que $\hbar$ lors des expériences. Le principe de moindre action gouverne l'évolution de la fonction d'onde. Le principe de moindre action explique donc la couleur de toutes les choses, toutes les autres sciences des matériaux, toute la chimie et toute la biologie, comme nous allons le voir dans ce qui suit.

Le mouvement des quantons avec spin

> “Everything turns.*”
>
> Anonyme

Quelle est l'origine de la phase quantique? La physique classique nous aide à répondre à la question. Tout comme les objets de la vie quotidienne, les quantons peuvent également tourner sur eux-mêmes autour d'un axe: on parle du *spin* de la particule. Mais si les particules quantiques peuvent tourner sur elles-mêmes, elles doivent posséder un moment cinétique. Et en effet, les expériences confirment cette déduction.

Page 93

En particulier, les électrons ont un spin. Tous les détails du spin de l'électron ont été déduits à partir des expériences de deux étudiants hollandais, George Uhlenbeck et Samuel Goudsmit, en 1925. Ils ont eu l'audace de publier ce que Ralph Kronig avait éga-

Ref. 61

* «Tout tourne.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

lement suspecté: que les électrons tournaient sur eux-mêmes autour d'un axe et que la projection du moment cinétique sur l'axe était donnée par $\hbar/2$. En fait, cette valeur, que l'on abrège souvent en «spin 1/2», est valide pour *toutes* les particules de *matière* élémentaires. (En revanche, toutes les particules élémentaires de *rayonnement* ont des valeurs de spin égales à $\hbar$, que l'on abrège en «spin 1».)

Si une particule qui tourne sur elle-même a un moment cinétique, il doit être possible d'en réarranger l'axe en lui appliquant un couple de forces, d'y observer une précession, de transférer le spin au cours de collisions, etc. Tous ces effets sont effectivement observés. Par exemple, l'expérience de Stern et Gerlach permet déjà toutes ces observations.
Page 94 La seule différence entre le spin d'une particule et le moment cinétique classique est que
Page 93 le spin d'une particule est quantifié, comme nous l'avons déduit plus haut.

Autrement dit, le *spin* L d'une particule quantique a toutes les propriétés d'une rotation autour d'un axe. Par conséquent, les particules quantiques *chargées*, tournant sur elles-mêmes, agissent comme des petits dipôles magnétiques (des aimants) orientés le long de l'axe de rotation. La force de l'aimant que l'on observe (le *moment magnétique*) est proportionnel au spin et au facteur de conversion $-e/2m_e$, comme on s'y attend en physique classique. Par conséquent, l'unité naturelle du moment magnétique de l'électron est la quantité $\mu_B = e\hbar/2m_e$, que l'on appelle le *magnéton de Bohr*. Il se trouve que le moment magnétique $\boldsymbol{\mu}$ des quantons se comporte différemment de celui des particules classiques. Les effets quantiques du spin sont décrits par ce que l'on nomme le *facteur de Landé* et que l'on note g,* qui est un nombre pur:

$$\boldsymbol{\mu} = g\frac{-e}{2m_e}\boldsymbol{L} = -g\mu_B\frac{\boldsymbol{L}}{\hbar}\,, \quad \text{avec} \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}\,. \tag{42}$$

À partir du spectre optique qu'ils ont observé, Uhlenbeck et Goudsmit ont déduit un
Page 120 facteur de Landé $g = 2$ pour l'électron. En physique classique, on s'attendrait à une
Ref. 62 valeur $g = 1$. La valeur expérimentale $g = 2$ a été expliquée par Llewellyn Thomas comme étant un effet relativiste, quelques mois après sa découverte expérimentale.

En 2004, les techniques expérimentales étaient devenues si sensibles qu'il devint possible de détecter l'effet magnétique du spin d'un seul électron attaché à une impureté (au sein d'un matériau autrement non magnétique). Les chercheurs espèrent aujourd'hui améliorer les microscopes dit «à force de résonance magnétique» jusqu'à ce qu'ils atteignent la résolution atomique.

En 1927, Wolfgang Pauli** découvrit comment introduire le spin 1/2 dans une description de la mécanique quantique: au lieu d'une fonction d'état décrite par un nombre

* En anglais, le facteur de Landé s'appelle tout simplement le «g-factor» [N.d.T.].

** Wolfgang Ernst Pauli (Vienne, 1900 – Zurich, 1958) écrivit, à l'âge de 21 ans, l'un des meilleurs textes sur les relativités restreint et générales. Il fut le premier à calculer les niveaux d'énergie de l'hydrogène en utilisant la théorie quantique, il découvrit le principe d'exclusion, il incorpora le spin dans la théorie quantique, il élucida la relation entre le spin et les statistiques, il démontra le théorème CPT, et il prédit le neutrino. Il était admiré pour son intelligence, et redouté pour ses critiques acerbes, qui lui valurent le surnom de «conscience de la physique». Malgré ce trait, il aida de nombreuses personnes dans leur recherche,
Ref. 63 tel que Heisenberg avec la théorie quantique, sans jamais s'attribuer le moindre mérite. Il était considéré par beaucoup, parmi lesquels Einstein, comme étant l'esprit le plus grand et le plus vif de la physique du XXe siècle. Il était également célèbre pour «l'effet Pauli», c.-à-d. sa capacité à déclencher des catastrophes dans les laboratoires, dans les machines et dans son entourage, du simple fait de sa présence. Comme nous

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

complexe unique, on a besoin d'une fonction d'état ayant *deux* composantes complexes. La raison de cette expansion est simple. En générale, la petite flèche tournante qui décrit un état quantique ne tourne *pas* autour d'un axe *fixe*, comme le suppose l'équation de Schrödinger. L'*axe de rotation* doit également être spécifié en chaque point de l'espace. Ceci implique que deux paramètres supplémentaires sont nécessaires en chaque point de l'espace, portant le nombre total de paramètres à quatre nombres réels, ou, de façon équivalente, à deux nombres complexes. De nos jours, l'équation de Pauli pour la mécanique quantique avec spin est principalement d'un intérêt conceptuel, parce que, comme celle de Schrödinger, elle n'est pas conforme avec la relativité restreinte.

En résumé, la description non relativiste d'un quanton avec spin implique l'utilisation d'une fonction d'onde qui spécifie *deux* nombres complexes en chaque point de l'espace et du temps. Le nombre complexe supplémentaire décrit le plan de rotation local du spin. L'idée d'introduire le plan de rotation local avait également été utilisée par Dirac lorsqu'il avait introduit la description relativiste de l'électron, et l'idée est également utilisée dans toutes les autres équations d'ondes pour des particule avec spin.

Les équations d'onde relativistes

En 1899, Max Planck avait découvert le quantum d'action. En 1905, Albert Einstein publiait la théorie de la relativité restreinte, qui était basée sur l'idée que la vitesse de la lumière c était indépendante de la vitesse de l'observateur. La première question que Planck se posa était de savoir si la valeur du quantum d'action pouvait être indépendante de la vitesse de l'observateur. C'est l'intérêt qu'il avait pour cette question qui le conduisit à inviter Einstein à Berlin. Par cette invitation, il rendit le clerc du bureau des patentes célèbre dans tout le monde de la physique.

Les expériences montrent que le quantum d'action est en effet indépendant de la vitesse de l'observateur. Tous les observateurs trouvent la même valeur minimale. Pour inclure la relativité restreinte dans la théorie quantique, il nous faut donc d'abord trouver l'hamiltonien quantique H correct, c.-à-d. l'opérateur énergie correct.

Pour une particule relativiste libre, la fonction hamiltonienne classique, c.-à-d. l'énergie de la particule, est donnée par

$$H = \pm\sqrt{c^4m^2 + c^2\boldsymbol{p}^2} \quad \text{avec} \quad \boldsymbol{p} = \gamma m\boldsymbol{v} \,. \tag{43}$$

On peut donc se demander quel est l'opérateur hamiltonien correspondant dans le monde quantique. La réponse la plus simple a été donnée, en 1949 par T.D. Newton et
Ref. 64 E.P. Wigner, et en 1950 par L.L. Foldy et S.A. Wouthuysen. L'opérateur est pratiquement le même:

$$H = \beta\sqrt{c^4m^2 + c^2\boldsymbol{p}^2} \quad \text{avec} \quad \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \tag{44}$$

le verrons bientôt, on peut prétendre que Pauli reçu le prix Nobel de physique en 1945 (officiellement «pour la découverte du principe d'exclusion») pour finalement régler la question du nombre d'anges que l'on peut faire danser sur la pointe d'une épingle.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les signes qui apparaissent dans l'opérateur matriciel β font la distinction, comme nous allons le voir, entre les particules et les antiparticules. Les nombres +1 et −1 apparaissent deux fois, pour prendre en compte les deux directions de spin possibles dans chacun des cas.

Avec cet opérateur hamiltonien relativiste pour les particules de spin 1/2 (ainsi que pour toutes les autres) la fonction d'onde est décrite par *quatre* nombres complexes, *deux* pour les particules et *deux* pour les antiparticules. Pourquoi? Nous avons vu plus haut qu'une particule quantique avec spin nécessitait deux composantes complexes pour son état. Ceci faisait suite à l'exigence de devoir spécifier, en tout point de l'espace, la longueur de la flèche, sa phase et son plan de rotation. Un peu plus tôt, nous avons également trouvé que la relativité introduisait automatiquement l'antimatière. (Nous explorerons ce point plus en détails un peu plus loin.) La matière et l'antimatière font donc toutes deux partie de n'importe quelle description relativiste des effets quantiques. La fonction d'onde d'une particule a des composantes d'antiparticules qui s'annulent, et vice versa. Au total, la fonction d'onde pour les particules relativistes de spin 1/2 a donc *quatre* composantes complexes.

Page 117
Vol. II, page 72
Page 217

L'opérateur hamiltonien conduit à l'opérateur vitesse $\boldsymbol{v}$ à partir de la même relation qui est valable en physique classique:

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x} = \beta \frac{\boldsymbol{p}}{\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2}} \,. \tag{45}$$

Cet opérateur vitesse possède un ensemble continu de valeurs propres, entre $+c$ et $-c$. La vitesse $\boldsymbol{v}$ est une constante du mouvement, tout comme le sont la quantité de mouvement $\boldsymbol{p}$ et l'énergie

$$E = \sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \,. \tag{46}$$

De même, le moment cinétique orbital $\boldsymbol{L}$ est défini comme en physique classique par,

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{x} \times \boldsymbol{p} \,. \tag{47}$$

Le moment cinétique orbital $\boldsymbol{L}$ et le spin $\boldsymbol{\sigma}$ sont des constantes du mouvement distinctes. Une particule (ou une antiparticule) avec une composante de moment cinétique positive (ou négative) a une fonction d'onde avec seulement une composante non nulle, alors que les trois autres composantes s'annulent.

Ref. 65

Mais hélas, la représentation du mouvement relativiste nommée en l'honneur de Foldy et Wouthuysen, n'est pas des plus simples lorsqu'il s'agit de prendre en compte les interactions électromagnétiques. L'identité simple entre la description classique et celle de la mécanique quantique disparait lorsque l'on introduit l'électromagnétisme. Nous résoudrons ce problème plus loin, lorsque nous explorerons l'équation d'évolution de Dirac pour les fonctions d'onde relativistes.

Page 214

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les mouvements liés, ou les quantons composites contre les quantons élémentaires

Quand peut-on dire qu'un objet est composite, et qu'il n'est pas élémentaire? Chaque fois qu'il contient des mouvements internes, ou liés. Dans quels cas cela se vérifie-t-il? La théorie quantique donne plusieurs réponses pragmatiques.

Le premier critère pour déterminer si une particule est composite est quelque peu étrange: un objet est un *composite* lorsque son rapport gyromagnétique est différent de celui prédit par l'électrodynamique quantique. Le *rapport gyromagnétique* γ (à ne pas confondre avec le facteur de dilatation relativiste) est défini comme étant le rapport entre le moment magnétique $\boldsymbol{M}$ et le moment cinétique $\boldsymbol{L}$:

Ref. 66
Page 214

$$\boldsymbol{M} = \gamma \boldsymbol{L} \,. \tag{48}$$

Le rapport gyromagnétique γ se mesure dans les unités $s^{-1}T^{-1}$ (c.-à-d. C/kg) et il détermine les niveaux d'énergie des particules magnétiques tournant sur elles-mêmes dans les champs magnétiques. On le retrouvera plus tard dans le contexte de l'imagerie par résonnance magnétique. Tous les candidats au qualificatif de particule élémentaire ont un spin 1/2. Le rapport gyromagnétique pour les particules de spin 1/2, de moment magnétique M et de masse m, peut s'écrire

Défi 77 f
Vol. V, page 162

$$\gamma = \frac{M}{\hbar/2} = g\frac{e}{2m} \,. \tag{49}$$

Le critère pour pouvoir être qualifié d'élémentaire peut donc se réduire à une condition sur la valeur du nombre sans dimension g, appelé le *facteur de Landé*. (L'expression $e\hbar/2m$ est souvent appelé le *magnéton* de la particule.) Si le facteur de Landé *diffère* de la valeur prédite par l'électrodynamique quantique pour les particules ponctuelles, qui est environ égal à $2,0$, alors l'objet est *composite*. Par exemple, un ion d'hélium $^4He^+$ a un spin 1/2 et une valeur pour g de $14,7 \cdot 10^3$. Le rayon de l'ion hélium est en effet de $3 \cdot 10^{-11}$ m, une valeur qui n'est évidemment pas infiniment petite, et l'ion est une entité composite. Pour le proton, on mesure un facteur de Landé d'environ $5,6$. Les expériences fournissent en effet une valeur non nulle pour le rayon du proton d'environ $0,9$ fm, et montrent qu'il contient plusieurs constituants.

Page 214

Le neutron, qui possède un moment magnétique bien qu'il soit électriquement neutre, se doit donc d'être composite. En effet, son rayon est approximativement le même que celui du proton. De façon similaire, les molécules, les montagnes, les étoiles et les gens doivent être composites. D'après ce premier critère, les seules particules élémentaires sont les *leptons* (c.-à-d. les électrons, les muons, les taus et les neutrinos), les *quarks* et les *bosons intermédiaires* (c.-à-d. les photons, les bosons W, les bosons Z et les gluons). Plus de détails concernant ces particules seront révélés au chapitre sur le noyau.

Vol. V, page 162

Un autre critère simple pour déterminer si une particule est composite vient juste d'être mentionné: *tout objet ayant une taille mesurable est composite*. Ce critère conduit à la même liste de particules élémentaires que le premier. En effet, les deux critères sont liés. Le modèle le plus simple pour les structures composites prédit que le facteur de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 67 Landé obéit à

$$g - 2 = \frac{R}{\lambda_C} , \tag{50}$$

où R est le rayon et $\lambda_C = h/mc$ est la longueur d'onde de Compton du système. Cette expression est d'une précision surprenante pour les ions d'hélium-4, l'hélium-3, les ions tritium et les protons, comme vous pourriez vouloir le vérifier. Les tableaux de l'annexe B du prochain volume établissent la même conclusion. En bref, le deuxième critère pour déterminer si une particule est composite est équivalent au premier.

Défi 78 f

Vol. V, page 342

Un troisième critère pour déterminer si une particule est composite est plus général: *tout objet plus grand que sa longueur de Compton est un composite*. L'argument est simple. Un objet est composite s'il est possible d'y détecter un mouvement *interne*, c.-à-d. le mouvement de constituants. Or, l'action de n'importe quelle partie ayant une masse m_{part} se déplaçant à l'intérieur d'un système composite de taille r obéit à

$$S_{\text{part}} < 2\pi r\, m_{\text{part}}\, c < \pi r\, m\, c \tag{51}$$

où m est la masse de l'objet *composite*. D'autre part, si on suit le principe de la théorie quantique, cette action, pour être observable, doit être plus grande que $\hbar/2$. Si on introduit cette condition, on trouve que pour n'importe quel objet composite*

$$r > \frac{\hbar}{2\pi m\, c} . \tag{52}$$

Le membre de droite diffère seulement d'un facteur $4\pi^2$ de la *longueur (d'onde) de Compton* de l'objet

$$\lambda = \frac{h}{m\, c} . \tag{53}$$

Donc, n'importe quel objet *plus gros* que sa propre longueur d'onde de Compton est un composite, et n'importe quel objet *plus petit* que le membre de droite de l'équation (52) est élémentaire. Une fois de plus, seuls les leptons, les quarks et les bosons intermédiaires réussissent le test. (Pour le *boson de Higgs* découvert en 2012, le test n'a pas encore été réalisé, mais on s'attend à ce qu'il se conforme également.) Tous les autres objets sont des composites. En bref, le troisième critère produit la même liste que les deux premiers. Pouvez-vous expliquer pourquoi?

Défi 80 f

Un quatrième critère pour déterminer si une particule est composite est régulièrement cité par Steven Weinberg: une particule est élémentaire si elle apparaît dans le lagrangien du modèle standard de la physique des particules, c.-à-d. dans la description des éléments constitutifs fondamentaux de la nature. Pouvez-vous montrer que ce critère se déduit des précédents?

Vol. V, page 261

Défi 81 e

Il est intéressant de noter que nous n'en avons pas encore terminé avec ce sujet. Des affirmations encore plus étranges concernant la distinction entre particules composites

Défi 79 pe

* Pouvez-vous trouver où est passé le facteur 2 manquant? Et est-ce que l'hypothèse qui prétend que les constituants doivent toujours être plus légers que le composite est valable?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

et particules élémentaires apparaitrons lorsque nous prendrons en compte la gravité. Essayez de patienter, cela en vaut la peine.

Vol. VI, page 313

Curiosités et défis amusants concernant le mouvement quantique de la matière

> Die meisten Physiker sind sehr naiv, sie glauben immer noch an wirkliche Wellen oder Teilchen.*
>
> Anton Zeilinger

Prenez la lame d'un couteau la plus aiguisée ou la pointe d'une aiguille la plus fine que vous puissiez imaginer: le quantum d'action implique que leurs contours ne sont pas nets, mais qu'ils sont flous, comme les contours d'un nuage. Prenez l'objet le plus dur et le plus solide que vous puissiez imaginer, tel qu'un diamant ou un morceau de tungstène: le quantum d'action implique que sa surface est plus ou moins molle. Toutes les expériences confirment ces affirmations. *Rien dans la nature n'est vraiment net et tranchant ou vraiment solide*. La physique quantique n'est donc pas d'accord avec plusieurs des idées des atomistes de la Grèce antique.

* *

Est-ce que les atomes d'hydrogène existent? La plupart des types d'atomes ont été imagés à l'aide de microscopes, photographiés sous éclairage, lévités un par un, et même déplacés un par un avec des aiguilles, comme le montre l'image de la page 344 du volume I. Des chercheurs ont même fait se déplacer des atomes individuels en utilisant des faisceaux laser pour les pousser. Cependant, aucune de ces expériences n'a mesuré ou visualisé des atomes d'hydrogène. Est-ce une raison pour douter de l'existence des atomes d'hydrogène? Cette discussion ne semble pas très sérieuse, mais la prendre au sérieux peut s'avérer très amusant.

Ref. 68

Défi 82 e

* *

Est-ce que la fonction d'onde est «réelles»? Plus précisément, est-ce que la fonction d'onde est réellement un nuage? Quelques physiciens en doutent encore. Ce groupe de physiciens, de moins en moins nombreux et souvent nés vers le milieu du XXe siècle, ont entendu dire si souvent (incorrectement et généralement par des autorités douteuses) qu'une fonction d'onde n'avait pas de réalité, qu'ils ont tout simplement arrêté de se poser les questions les plus simples, et d'y répondre. Pour dissiper leurs doutes, demandez-leurs s'ils ont une taille non nulle ou s'ils pensent que les atomes sont ronds. S'ils sont d'accord, ils doivent admettre que les fonctions d'ondes ont une part de réalité. Tous les objets de la vie quotidienne sont constitués de particules élémentaires qui sont si petites que leur taille n'est même pas mesurable, de sorte que l'on peut les qualifier de particules ponctuelles. Donc, la taille, la surface et le volume de tous les objets de notre quotidien sont exclusivement dus aux fonctions d'ondes. Toutes les longueurs, toutes les surfaces et tous les volumes sont des preuves que les fonctions d'ondes ont une part de réalité.

Défi 83 f

* «La plupart des physiciens sont très naïfs, ils croient encore aux vraies ondes ou aux vraies particules.» Anton Zeilinger, physicien à l'Université de Vienne, est réputé pour ces expériences en mécanique quantiques.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

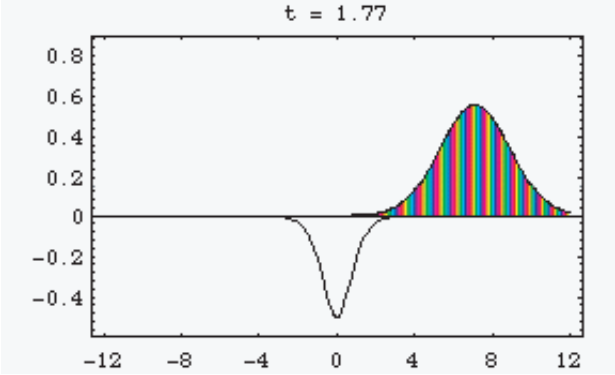


FIGURE 55 Un puits de potentiel spécial qui ne perturbe *pas* une fonction d'onde. La couleur indique la phase. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

* *

Deux observables peuvent commuter pour deux raisons différentes: soit elles sont très *similaires* (telles que la coordonnée x et la grandeur x^2) soit elles sont très *différentes* (telles que la coordonnée x et la quantité de mouvement p_y). Pouvez-vous donner une explication à cela?

Défi 84 d

* *

Les translations d'espace et de temps commutent. Mais alors, pourquoi est-ce que l'opérateur quantité de mouvement et l'hamiltonien ne commutent-ils pas en générale?

Défi 85 pe

* *

Il existe des potentiels spéciaux qui n'ont *pas* d'influence sur une fonction d'onde. La Figure 55 en montre un exemple. Ce potentiel a un coefficient de réflexion nul à toutes les énergies; l'onde diffusée n'a pas de partie réfléchie. La raison mathématique est fascinante. Le puits de potentiel a la forme d'un soliton de l'équation de Korteweg-de Vries. Cette équation a un lien avec l'équation de Schrödinger.

* *

Tout système lié dans un état non relativiste et n'ayant pas de moment cinétique, obéit à la relation

Ref. 69

$$\langle r^2 \rangle \, \langle T \rangle \geqslant \frac{9\hbar^2}{8m} \,, \tag{54}$$

où m est la masse réduite, T est l'énergie cinétique des constituants et r est la taille du système. Pouvez-vous déduire ce résultat et le vérifier dans le cas de l'état fondamental de l'hydrogène?

Défi 86 e

* *

Au lycée, il est souvent logique de se représenter les fonctions d'onde des électrons comme un type particulier de matière fluide, que l'on appelle l'*électronium* et dont la densité de charge est négative. Dans cette représentation, un atome est un noyau posi-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tif entouré par un nuage d'électronium. Déformer le nuage d'électronium autour d'un noyau nécessite de l'énergie. Cela se produit par exemple lorsqu'un photon ayant la bonne fréquence est absorbé. Lorsque des atomes de types compatibles s'approchent les uns des autres, les nuages d'électronium forment souvent des ponts stables (des liaisons chimiques).

* *

La théorie quantique autorise de nombreux états liés inhabituels. En général, lorsque l'on pense à des états liés on pense à des états de basses énergies. Mais il existe des situations pour lesquelles les états liés surviennent en raison de contraintes externes par des potentiels oscillants. Nous avons rencontré une telle situation en physique classique: le pendule renversé, entrainé verticalement et qui reste vertical bien qu'il soit dans une configuration instable. Des situations similaires se produisent également en physique quantique. Des exemples sont les pièges de Paul, l'atome d'hélium, les ions négatifs, les *électrons troyens* et les accélérateurs de particules.

Vol. I, page 319

Ref. 70

* *

On lit souvent que l'Univers aurait pu naître à partir d'une fluctuation quantique. Pouvez-vous expliquer pourquoi cette affirmation n'a aucun sens?

Défi 87 e

Un résumé sur le mouvement des quantons de matière

En résumé, le mouvement des quantons massiques, c.-à-d. des particules de matière quantiques, peut se décrire de deux façons:

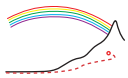
— Sous un fort grossissement, les particules de matière quantiques sont décrites par des fonctions d'onde qui se déplacent comme *des nuages de flèches, qui avancent, qui tournent sur elles-mêmes et qui subissent une précession*. L'orientation locale du nuage (la phase locale) suit un mouvement d'oscillation. Le carré de la fonction d'onde, c.-à-d. la densité du nuage, est la probabilité de trouver la particule en un lieu donné.
— Lorsqu'on la regarde de loin, avec un grossissement faible, une particule quantique massique qui se déplace se comporte comme *une flèche unique qui avance, qui tourne et qui subit une précession*. Les détails de la rotation et de la précession de la flèche dépendent de l'énergie et de la quantité de mouvement de la particule ainsi que du potentiel auquel elle est soumise. La flèche est une amplitude de probabilité: le carré de la longueur de la flèche est la probabilité d'observer la particule. Si une particule peut se rendre d'un point de départ à un point d'arrivé par plusieurs chemins, les amplitudes de probabilité de chaque chemin s'additionnent

La flèche tournante unique est le résultat d'une moyenne sur le nuage. La flèche unique combine les propriétés d'une particule et d'une onde. Une rotation complète de la flèche correspond au quantum d'action $\hbar$. Cette caractéristique centrale implique qu'une particule non relativiste dont le spin peut être négligé, suit l'équation de Schrödinger, et qu'un électron relativiste suit l'équation de Dirac. L'équation de Dirac est en accord avec toutes les expériences connues. En particulier, l'équation de Dirac décrit toute la

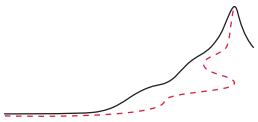
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

science des matériaux, toute la chimie et toute la biologie, comme on va le découvrir.

Pour continuer le plus efficacement possible sur notre chemin à travers la physique quantique, nous explorons maintenant trois sujets importants: l'indistinguabilité des particules de même type, le spin des particules quantiques et la signification des probabilités.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chapitre 5

La permutation des particules – les particules sont-elles comme les gants?

Pourquoi sommes-nous capables de distinguer deux jumeaux l'un de l'autre? Pourquoi pouvons-nous distinguer ce qui se ressemble, telle qu'une copie de son original? La plupart d'entre nous sommes convaincus que chaque fois que l'on compare un original avec une copie, il est possible de trouver une différence. Cette conviction se trouve être également correcte dans le domaine quantique, mais la conclusion n'est pas aussi simple.

Pensez à n'importe quelle méthode qui vous permette de distinguer des objets: vous
Défi 88 e constaterez que cela pose des problèmes lorsqu'il s'agit de particules ponctuelles. Donc, dans le domaine quantique, quelque chose doit changer en ce qui concerne notre capacité à distinguer les particules et les objets.

Nous pourrions argumenter qu'il est toujours possible d'éliminer la différence entre un objet original et sa copie: il devrait être suffisant d'utiliser le même nombre et le même type d'atomes. En fait, le quantum d'action montre que cela n'est pas suffisant, bien que tous les atomes d'un même type soient en effet des copies indistinguables les unes des autres! Dans ce qui suit, nous explorons les conséquences les plus importantes de l'indistinguabilité des atomes et de la distinguabilité des objets macroscopiques sur le mouvement.

Différencier les objets macroscopiques

Quelques-unes des propriétés importantes des objets sont mises en évidence en étudiant un casse-tête combinatoire: le *problème du gant*. Il pose la question:

> Combien de gants chirurgicaux (de la main droite) sont nécessaires si m médecins doivent opérer w malades en respectant les règles d'hygiène, afin que personne n'entre en contact avec les fluides corporels de quelqu'un d'autre?

Le même problème apparaît également dans d'autres situations. Par exemple, il
Ref. 71 s'applique aux ordinateurs, avec les interfaces et les virus informatiques ou aux préservatifs, avec les hommes et les femmes (il est alors appelé le *problème du préservatif*). Pour être clair, le nombre optimal de gants n'est *pas* le produit mw. En fait, le problème se divise en trois cas.

— Le cas simple où $m = w = 2$ fournit déjà les idées les plus importantes dont on a
Défi 89 e besoin. Pouvez-vous trouver la solution optimale ainsi que la procédure?
Défi 90 f — Dans le cas où $w = 1$ et m est impaire, la solution est $(m + 1)/2$ gants. L'expression

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

similaire $(w+1)/2$ est valable pour le cas où $m = 1$ et w est impaire. C'est la solution optimale, comme vous pouvez facilement le vérifier vous-même.

— Une solution avec une procédure simple pour toutes les autres situations est donnée par $\lceil 2w/3 + m/2 \rceil$ gants, où $\lceil x \rceil$ signifie le plus petit entier supérieur ou égale à x. Par exemple, pour deux docteurs et trois malades, cela fait seulement trois gants. (Cependant, cette formule ne donne pas toujours la solution optimale, et des solutions meilleures existent dans certains cas.)

Ref. 72

Défi 91 f

Amusez-vous à résoudre ce casse-tête. Vous constaterez que trois propriétés fondamentales des gants déterminent la solution. Premièrement, les gants ont deux faces, une intérieure et une extérieure, qui peuvent être distinguées l'une de l'autre. Deuxièmement, les gants que l'on tourne à l'envers, inversent leur caractère droite/gauche et peuvent donc être distingués des gants qui n'ont pas été inversés. Troisièmement, les gants sont distinguables les uns des autres.

Maintenant, nous retournons à notre objectif initial: est-ce que les trois propriétés fondamentales des gants s'appliquent également aux particules quantiques? Nous explorerons la question de la double face des particules quantiques lors de la dernière partie de notre ascension de la montagne. La question de savoir si les particules peuvent être tournées à l'envers sera importante pour leur description et pour leur mouvement. Nous explorerons aussi la différence entre les particules à hélicité droites et les particules à hélicité gauches, mais seulement dans la prochaine partie de notre aventure. Dans ce chapitre nous nous concentrons sur le troisième problème, à savoir si les objets et les particules peuvent toujours être distinguées de leurs copies. Nous découvrirons que les particules *élémentaires* ne se comportent pas comme des gants, mais d'une manière beaucoup plus surprenante.

Vol. VI, page 114

Vol. V, page 245

Dans la vie quotidienne, la distinction des objets macroscopique peut se faire de deux façons. D'une part, nous sommes capables de distinguer les objets (ou les gens) les uns des autres parce qu'ils diffèrent par leurs *propriétés intrinsèques*, telles que leur masse, leur couleur, leur taille ou leur forme. D'autre part, nous sommes capables de distinguer les objets même s'ils ont les mêmes propriétés intrinsèques. N'importe quelle partie de billard nous renseigne qu'il est possible de distinguer une boule parmi les autres simplement en suivant sa trajectoire. En bref, nous pouvons distinguer des objets ayant des propriétés identiques en utilisant aussi leur *état*.

L'état d'une boule de billard est donné par sa position, sa quantité de mouvement et son moment cinétique. Nous pouvons distinguer deux boules de billard identiques parce que l'erreur sur la mesure de la position de chaque boule est bien plus petite que la taille de la boule elle-même. Le fait que deux boules de billard aient des états différents permet de suivre chaque boule. Cependant, dans le domaine microscopique, ceci n'est pas possible! Prenons deux atomes d'un même type. Ces deux atomes ont exactement les mêmes propriétés intrinsèques. Pour être capable de les distinguer lors des collisions, nous avons besoin de suivre leur mouvement. Mais à cause du quantum d'action et de la relation d'indétermination qui en découle, nous avons aucune chance de pouvoir le faire. En fait, une expérience simple, qui remonte au XIXe siècle, a montré que la nature elle-même n'était pas capable de le faire! Ce résultat fondamental a été découvert en étudiant des systèmes constitués de grands nombres d'atomes d'un même type et qui s'entrechoquent: les *gaz*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Distinguer les atomes

Vol. I, page 402 Quelle est l'entropie d'un gaz? Le calcul de l'entropie S d'un *gaz simple*, constitué de N particules simples* de masse m et se déplaçant dans un volume V, donne

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{\Lambda^3}\right] + \frac{3}{2} + \frac{\ln\alpha}{N} \,. \tag{55}$$

Ici, k est la constante de Boltzmann, ln est le logarithme népérien et $\Lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mkT}$ est la longueur d'onde thermique (approximativement la longueur d'onde de de Broglie des particules qui composent le gaz), où T est la température. Dans ce résultat, le nombre pur α est égale à 1 si les particules sont distinguables comme les boules de billard, et il est Défi 92 f égale à $1/N!$ si elles ne sont pas distinguables du tout. Mesurer l'entropie d'un gaz simple nous permet donc de déterminer α et donc de tester expérimentalement si les particules sont distinguables.

Il se trouve que seul le deuxième cas, $\alpha = 1/N!$, décrit la nature. Nous pouvons le vérifier facilement sans même avoir besoin de faire la mesure: ce n'est que dans le deuxième Défi 93 f cas que l'entropie des volumes de deux gaz identiques s'*additionne*.** Le résultat, souvent appelé le *paradoxe de Gibbs****, démontre donc que les composants microscopiques de Ref. 73 la matière sont *indistinguables*: dans un système de particules quantiques (qu'elles soient des électrons, des protons, des atomes ou des petites molécules) il n'y a pas moyen de distinguer une particule parmi les autres.

L'indistinguabilité des particules est donc une propriété expérimentale de la nature. Elle est valide sans exception. Par exemple, quand la radioactivité a été découverte, les gens pensaient qu'elle contredisait l'indistinguabilité des atomes, parce que la désintégration semblait cibler certains atomes par rapport à d'autres. Mais la théorie quantique montra alors que cela n'était pas le cas et que même les atomes et les molécules étaient indistinguables.

Puisque $\hbar$ apparaît dans l'expression de l'entropie, l'indistinguabilité est un effet quantique. En effet, l'indistinguabilité ne joue aucun rôle si les effets quantiques sont négligeables, tel que dans le cas des boules de billard. Néanmoins, l'indistinguabilité est importante dans la vie quotidienne. Nous découvrirons que les propriétés de la matière

* Des particules sont *simples* si elles sont entièrement décrites par leur quantité de mouvement et leur position. Les atomes sont des particules simples. Les molécules ne sont pas simples, car elles sont également décrites par leur orientation.

** En effet, les valeurs de l'entropie que l'on observe lors des expériences, pour un gaz monoatomique, sont Défi 94 d données par la formule dite de Sackur-Tetrode

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{N\Lambda^3}\right] + \frac{5}{2} \tag{56}$$

qui est obtenue en insérant $\alpha = 1/N!$ ci-dessus. Elle a été déduite indépendamment par le physicien allemand Otto Sackur (1880 – 1914) et par le physicien hollandais Hugo Tetrode (1895 – 1931). Notez que le paramètre essentiel est le rapport entre V/N, le volume classique par particule, et Λ^3, le volume de de Broglie d'une particule quantique.

*** Josiah Willard Gibbs (1839 – 1903), physicien des États-Unis qui a été, avec Maxwell et Planck, l'un des trois fondateurs de la mécanique statistique et de la thermodynamique. Il a introduit le concept d'*ensemble* et le terme de «*phase thermodynamique*».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 56 Willard Gibbs (1839 – 1903)

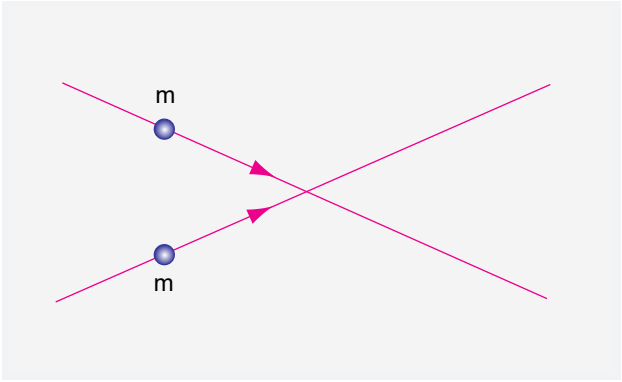


FIGURE 57 Des objets identiques dont les trajectoires se croisent.

du quotidien (les plasmas, les gaz, les liquides et les solides) seraient complètement différentes sans l'indistinguabilité. Par exemple, nous découvrirons que sans elle, les couteaux et les épées ne couperaient pas. De plus, le sol ne pourrait pas supporter notre poids, nous passerions directement à travers. Pour étayer plus en détails le problème, nous explorons la question suivante.

Pourquoi l'indistinguabilité apparaît-elle dans la nature?

Prenez deux particules quantiques ayant la même masse, la même composition et la même forme, tels que deux atomes du même type. Imaginez que leurs trajectoires se croisent et qu'en leur point de rencontre, elles s'approchent l'une de l'autre à une courte distance, comme le montre la Figure 57. Dans un gaz, cela peut être par exemple des collisions entre atomes ou bien lorsque deux atomes se manquent de justesse. Or, toutes les expériences jamais réalisées montrent qu'à de courtes distances, il est impossible de dire si les deux quantons ont interverti leur rôle ou non.

▷ Dans un gaz, il est *impossible* de suivre les particules quantiques en mouvement et de déterminer laquelle est l'une et laquelle est l'autre. Suivre des quantons qui entrent en collision est impossible.

L'impossibilité de distinguer des particules proches est une conséquence directe du

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

quantum d'action $\hbar$. Pour une trajectoire qui fait passer deux particules qui s'approchent très près l'une de l'autre, une inversion des rôles ne nécessiterait qu'une petite quantité de changement, c.-à-d. une petite action (physique). Mais nous savons qu'il y a une action observable minimale dans la nature. Pouvoir suivre la trace de chaque particule quantique à de petites distances nécessiterait une valeur d'action *plus petite* que le quantum d'action. L'existence du quantum d'action rend donc impossible le suivi des particules quantiques lorsqu'elles s'approchent trop près les unes des autres. Toute description de systèmes comportant plusieurs quantons doit donc prendre en compte le fait qu'après une rencontre rapprochée il est impossible de distinguer deux quantons l'un de l'autre.

Si on se souvient que la théorie quantique décrit les quantons comme étant des nuages, l'indistinguabilité apparaît encore plus naturelle. Chaque fois que deux nuages se rencontrent puis se séparent à nouveau, il est impossible de dire lequel est l'un et lequel est l'autre. D'un autre côté, si deux particules sont maintenues à une distance suffisante l'une de l'autre, la distinguabilité est bien réelle. L'indistinguabilité n'apparaît donc que lorsque les particules s'approchent de près.

En bref, l'indistinguabilité est une conséquence naturelle et inévitable de l'existence d'une valeur d'action minimale dans la nature. Ce résultat nous conduit directement vers la question suivante.

Est-il possible de compter les particules quantiques?

Dans la vie quotidienne, il est possible de compter les objets parce que nous pouvons les distinguer. Puisque les particules quantiques ne peuvent pas toujours être distinguées, il nous faut faire preuve de vigilance lorsque nous décidons de la façon de les compter. La première étape lorsque l'on veut compter des particules est de définir ce que l'on entend par une situation sans aucune particule du tout. Cela semble une chose facile à faire, mais nous rencontrerons plus loin des situations pour lesquelles cette étape fait déjà face à des difficultés. Mais dans tous les cas, la première étape pour pouvoir compter est donc de *spécifier ce qu'est le vide*. N'importe quelle méthode de comptage nécessite que la situation sans particule soit traitée séparément des situations avec particules.

La deuxième étape nécessaire au comptage est la spécification d'une observable utile à la détermination du nombre de particules quantiques. Le moyen le plus simple est de choisir un des nombres quantiques conservatifs qui s'additionnent lors des compositions, telle que la charge électrique. Le comptage en lui-même est alors réalisé en mesurant la charge totale et en divisant par l'unité de charge.

Dans la vie quotidienne, le poids (la masse) est couramment utilisé comme observable. Cependant, en général, on ne peut pas l'utiliser dans le domaine quantique, excepté pour des cas simples. Dans les cas comportant un grand nombre de particules, l'énergie d'interaction introduit des erreurs. Si le nombre de particules est encore plus grand, l'énergie de liaison gravitationnelle cause également des problèmes. Mais pardessus tout, pour les phénomènes transitoires (les particules instables ou les temps de mesure courts) les mesures de masses montrent leurs limites. En bref, même si compter des atomes stables en mesurant leur masse est possible dans la vie quotidienne, la méthode n'est pas applicable en général. En particulier, elle ne peut pas s'appliquer aux particules de hautes énergies.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Compter à l'aide de nombres quantiques conservatifs à plusieurs avantages. Premièrement, cela fonctionne aussi pour les phénomènes transitoires (les particules instables ou les temps de mesure courts). Deuxièmement, que les particules soient distinguables ou non n'a pas d'importance et le comptage marche toujours. Troisièmement, les particules virtuelles ne sont pas comptées. Ce fait est le bienvenu, comme nous le verrons, parce que dans le cas des particules virtuelles, c.-à-d. les particules pour lesquelles $E^2 \neq p^2c^2 + m^2c^4$, il n'y a, de toute façon, *aucun moyen* de définir un nombre de particules. L'utilisation d'une grandeur qui se conserve est donc en effet la meilleure méthode possible pour compter des particules.

Vol. II, page 72
Vol. V, page 127
Vol. II, page 72

L'effet indésirable lorsque l'on compte à l'aide de nombres quantiques est que les antiparticules sont comptées négativement! Cette conséquence est également due au quantum d'action. Nous avons vu plus haut que le quantum d'action impliquait que même dans le vide, des paires de particules-antiparticules étaient observées aux énergies suffisamment élevées. Par conséquent, une antiparticule doit être comptée comme moins une particule. Autrement dit, n'importe quel moyen utilisé pour compter les particules quantiques peut produire une erreur à cause de cet effet. Dans la vie quotidienne cette limitation ne joue aucun rôle, parce qu'il n'y a pas d'antimatière autour de nous. Cependant, elle joue bel et bien un rôle aux énergies plus élevées. Il se trouve qu'il n'existe pas de méthode générale pour compter séparément le nombre exact de particules et d'antiparticules; seule la somme peut être déterminée. En bref, la théorie quantique montre que le comptage des particules n'est jamais parfait.

En résumé, la nature nous fournit effectivement un moyen pour compter les particules quantiques même s'il n'est pas possible de les distinguer, mais seulement dans les conditions de la vie quotidienne, aux basses énergies. À cause du quantum d'action, les antiparticules sont comptées négativement. Les antiparticules représentent donc une limite au comptage des particules de hautes énergies, lorsque l'équivalence masse-énergie devient importante.

Qu'est-ce que la symétrie de permutation?

Puisque les particules quantiques sont dénombrables mais qu'elles sont indistinguable, il existe une symétrie de la nature pour les systèmes composés de plusieurs quantons identiques. La *symétrie de permutation*, également appelée *symétrie d'échange*, est la propriété de la nature qui fait que les observations sont inchangées après un échange de particules identiques. La symétrie de permutation constitue l'un des quatre piliers de la théorie quantique, avec la symétrie d'espace-temps, la symétrie de jauge et la symétrie de renormalisation que nous n'avons pas encore rencontrée. La symétrie de permutation est une propriété des systèmes *composites*, c.-à-d. des systèmes composés de nombreux sous-systèmes (identiques). Ce n'est que dans le cas de ces systèmes que l'indistinguabilité joue un rôle.

Autrement dit, «indistinguable» n'est pas la même chose que «identique». Deux particules quantiques d'un même type ne sont pas les *mêmes*, elles sont plutôt comme deux copies exactes l'une de l'autre. D'autre part, l'expérience de la vie quotidienne nous montre que deux copies peuvent toujours être différenciées par une inspection minutieuse, de sorte que le terme «copie» n'est pas totalement approprié non plus.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Les quantons (les particules quantiques) sont dénombrables et totalement indistinguables.* Les particules quantiques sont des *copies parfaites* les unes des autres.

Étant des copies parfaites, même la nature ne peut pas distinguer les particules. Par conséquent, la symétrie de permutation apparaît.

Dans le chapitre suivant, nous découvrirons qu'une permutation est une rotation partielle. La symétrie de permutation est donc une symétrie par rapport aux rotations partielles. Pouvez-vous trouver pourquoi?

Défi 95 f

L'indistinguabilité et la symétrie de la fonction d'onde

L'indistinguabilité des particules quantiques conduit à des conclusions importantes concernant la description de leur état de mouvement. La raison en est qu'il est impossible, dès le départ, de formuler une description du mouvement qui incorpore l'indistinguabilité. (Pouvez-vous confirmer cela?) Il nous faut décrire un état à n particules avec un état $\Psi_{1\dots i\dots j\dots n}$ qui suppose que la distinction soit possible, comme l'exprime l'ordre des indices dans la notation, et introduire ensuite l'indistinguabilité.

Défi 96 e

L'indistinguabilité (la symétrie de permutation) signifie que l'échange de deux particules quantiques quelconques produit les mêmes observations physiques.** Or, deux états quantiques ont les mêmes propriétés physiques s'ils diffèrent au mieux par un facteur de phase. L'indistinguabilité nécessite donc que

$$\Psi_{1\dots i\dots j\dots n} = \mathrm{e}^{i\alpha}\, \Psi_{1\dots j\dots i\dots n} \tag{57}$$

pour un angle α inconnu. Si on applique cette expression deux fois, en échangeant à nouveau le même couple d'indices, on en conclut que $\mathrm{e}^{2i\alpha} = 1$. Ceci implique que

$$\Psi_{1\dots i\dots j\dots n} = \pm\, \Psi_{1\dots j\dots i\dots n}\,. \tag{58}$$

Autrement dit, une fonction d'onde est soit *symétrique* soit *antisymétrique* par rapport à l'échange d'indices. (Nous pouvons dire également que la valeur propre de l'opérateur d'échange est soit +1 soit −1.)

▷ La théorie quantique prédit donc que les particules quantiques ont deux façons différentes d'être indistinguables.***

▷ Les particules qui correspondent à des fonctions d'ondes *symétriques* (celles qui se transforment par rapport à l'échange de particule avec un '+' dans

* Le mot «indistinguable» est un peu long, de sorte que de nombreux physiciens parlent néanmoins, et négligemment, de particules «identiques». Faites attention.

** Nous sommes donc dans la même situation que celle que nous avons déjà rencontrée plusieurs fois: *trop de spécification dans la description mathématique*, l'ordre explicite des indices dans ce cas, *implique une symétrie de cette description*, qui dans notre cas est une symétrie par rapport au changement d'indice, c.-à-d. par rapport à un échange de particules.

*** Cette conclusion s'applique à l'espace à trois dimensions. En deux dimensions, il existe plus de possibilités. Ces possibilités ont été, et sont encore partiellement, le sujet de recherches.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

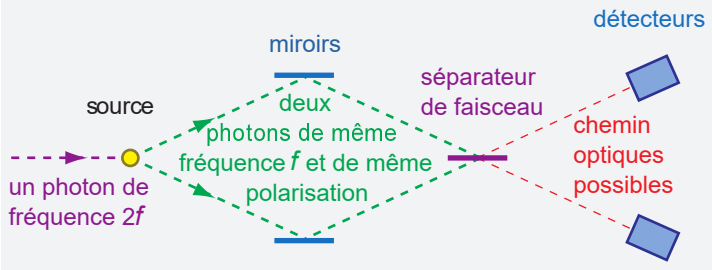


FIGURE 58 Émission et interférence de deux photons: deux photons indistinguables arrivent toujours ensemble, dans le même détecteur.

l'équation (58)) s'appellent* des *bosons*.

▷ Les particules qui correspondent à des fonctions d'ondes *antisymétriques* (celles qui se transforment par rapport à l'échange de particule avec un '–' dans l'équation (58)) s'appellent** des *fermions*.

Les expériences montrent que le comportement de l'échange dépend du *type* de particule. Il se trouve que les photons sont des bosons. Au contraire, les électrons, les protons et les neutrons sont des fermions. De plus, environ la moitié des atomes se comportent comme des bosons (aux énergies modérées), l'autre moitié étant des fermions. Pour déterminer le type d'un atome, il est nécessaire de prendre en compte le spin de l'électron et celui du noyau.

En fait, il se trouve qu'un composite ayant un nombre *pair* de fermions (aux énergies modérées), ou un nombre quelconque de bosons (à n'importe quelle énergie) est un boson. Un composite ayant un nombre *impair* de fermions est (toujours) un fermion. Par exemple ^{4}He est un boson, ^{3}He est un fermion. Les isotopes naturels ^{23}Na, ^{41}K, ^{85}Rb, ^{87}Rb et ^{133}Cs sont également des bosons, car ils ont des nombres impairs d'électrons et de nucléons. En revanche, ^{40}K et ^{134}Cs sont des fermions (et dans ce cas, également radioactifs).

Le comportement des photons

Une expérience simple, décrite sur la Figure 58, permet d'observer un aspect important du comportement des photons. Prenez une source qui émet simultanément deux pho-

* Les «bosons» ont été nommés en référence au physicien Satyenra Nath Bose (Calcutta, 1894 – Calcutta, 1974) qui fut le premier à décrire les propriétés statistiques des photons. Son travail fut repris plus tard par Albert Einstein, de sorte que l'on parle de la statistique de Bose-Einstein. Ref. 74

** Le terme «fermion» dérive du nom du physicien et lauréat de prix Nobel, Enrico Fermi (Rome, 1901 – Chicago, 1954), célèbre pour son génie universel en physique théorique et expérimentale. Il travailla principalement en physique des particules nucléaires et élémentaires, sur le spin et en statistique. On l'appelait «l'ingénieur quantique» pour ses travaux expérimentaux. Il est également célèbre pour ses cours qui sont toujours publiés dans leur version écrite de sa propre main, et pour son approche brillante des problèmes physiques. Néanmoins, son prix Nobel, hautement mérité, a été l'un des quelques cas pour lesquels le prix a été décerné pour une découverte qui s'est avérée incorrecte. Il quitta l'Italie à cause du mauvais traitement dont était victime sa femme juive et émigra aux USA. Fermi travailla sur le projet Manhattan qui construisit les premières bombes atomiques. Après la Seconde Guerre mondiale, il organisa l'un des meilleurs départements de physique du monde à l'Université de Chicago, où tous les gens qui travaillaient avec lui l'admiraient.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

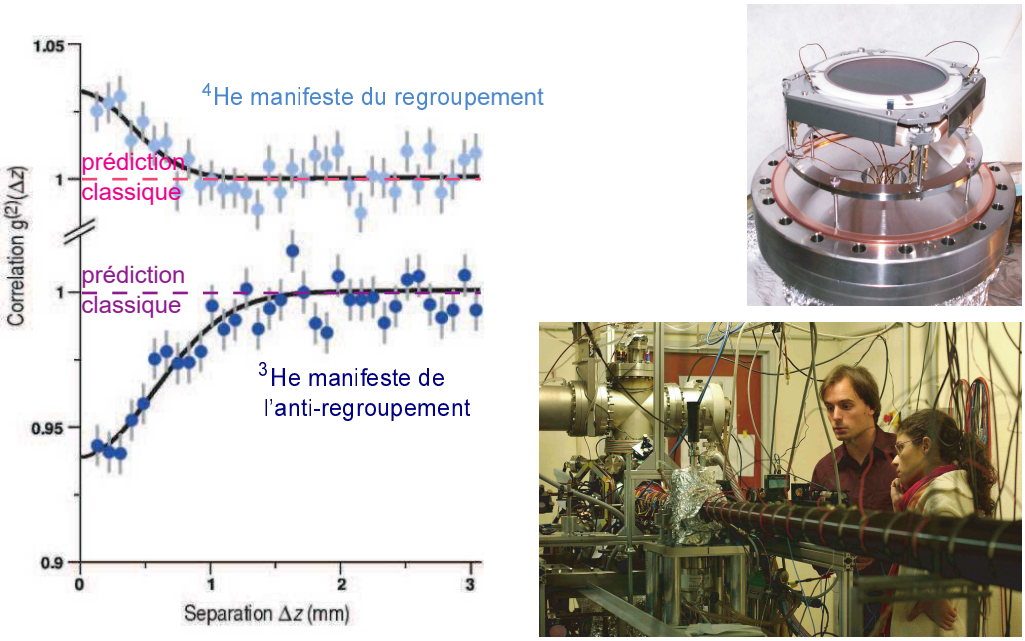


FIGURE 59 Regroupement et anti-regroupement des atomes d'hélium ^{3}He et ^{4}He: le résultat des mesures, le détecteur et l'expérience. (reproduit de atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html, photo © Denis Boiron, Jerome Chatin)

tons indistinguables, c.-à-d. deux photons de fréquence et de polarisation identiques. La paire de photons se trouve donc dans un état intriqué. Au laboratoire, une telle source peut être produite à l'aide d'un convertisseur bas, un matériau qui converti un photon de fréquence $2f$ en deux photons de fréquence f. Les deux photons intriqués, après avoir parcouru exactement la même distance, sont amenés à entrer chacun par un des deux côtés d'un séparateur de faisceau idéal (par exemple un miroir semi-réfléchissant argenté). Deux détecteurs se trouvent aux deux sorties du séparateur de faisceau. Les expériences
Ref. 75 montrent que les deux photons sont toujours détectés ensemble, du *même* côté, et jamais séparément, un de chaque côté. La raison en est que les deux options pour lesquelles un des photons est transmis et l'autre réfléchi, interfèrent de manière destructive. (La dis-
Page 66 cussion que nous avons mentionnée plus haut s'applique également ici: bien que deux photons soient impliqués, lorsque l'on étudie les détails, on constate, dans ce cas aussi, qu'un seul photon interfère avec lui-même.)

L'expérience montre que les photons sont des *bosons*. En effet, dans la même expérience, les fermions se comportent exactement de façon inverse: deux fermions sont tou-
Ref. 76 jours détectés séparément, *un de chaque* côté, mais jamais ensemble, du même côté.

Le regroupement et l'anti-regroupement

Une autre façon de tester les propriétés d'échange d'une particule est l'expérience de
Page 59 Hanbury Brown et Twiss que nous avons décrite plus haut. Tout d'abord, cette belle expérience montre que les particules quantiques se comportent différemment des particules classiques. De plus, comparées aux particules classiques, les fermions manifestent

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

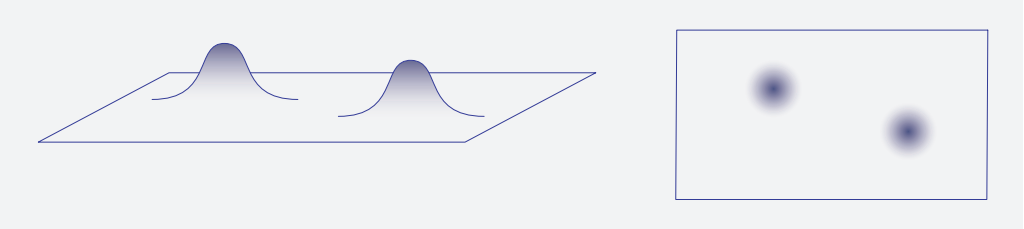


FIGURE 60 Se représenter des particules comme des excitations localisées (gauche) ou des nuages (droite).

de l'anti-regroupement (à cause du principe d'exclusion de Pauli) et les bosons manifestent du regroupement. Hanbury Brown et Twiss réalisèrent leur expérience avec des photons, qui sont des bosons.

Ref. 77 En 2005, une collaboration de recherche franco-hollandaise réalisa l'expérience avec des atomes. En utilisant un gaz d'hélium extrêmement froid à 500 nK et un principe de détection astucieux, ils réussirent à mesurer des courbes de corrélation typiques pour cet effet. Les résultats, que montre la Figure 59, confirment que ^{3}He est un fermion et que ^{4}He est un boson, tout comme le prédit la règle de composition des particules quantiques.

La symétrie de permutation dépend de l'énergie

Si les expériences nous obligent à conclure que personne, pas même la nature, ne peut faire la distinction entre deux particules d'un même type, on en déduit qu'elles ne forment pas deux entités séparées, mais une certaine forme d'unité. Notre perception classique et naïve d'une particule en tant qu'entité séparée du reste du monde est donc une description incorrecte du phénomène de «particule». En effet, dans le cas de particules ayant des propriétés intrinsèques identiques, aucune expérience ne peut suivre leur trajectoire d'une manière qui pourrait les distinguer avec certitude. Cette impossibilité a été vérifiée expérimentalement avec toutes les particules élémentaires, avec des noyaux, avec des atomes et avec de nombreuses molécules.

Comment cela s'intègre-t-il dans la vie quotidienne, c.-à-d. avec la physique classique? Les photons ne nous inquiètent pas beaucoup ici. Concentrons la discussion sur les particules de matière. Nous savons comment distinguer des électrons en désignant les différents fils électriques dans lesquels ils circulent. De même, nous sommes capables de distinguer notre propre réfrigérateur, avec ses électrons et ses atomes, de celui de notre voisin. Alors que le quantum d'action rend la distinction impossible, la vie quotidienne l'autorise.

L'explication la plus simple pour ces deux observations est d'imaginer une particule microscopique, plus particulièrement une qui soit élémentaire, comme un *renflement*, c.-à-d. une excitation localisée du vide, ou comme un nuage minuscule. La Figure 60 montre deux de ces renflements ainsi que deux nuages représentant des particules. Il est évident que lorsque deux particules sont trop proches l'une de l'autre, cela n'a aucun sens de les distinguer; on ne peut plus dire laquelle est l'une et laquelle est l'autre.

L'image du renflement montre que dans le cas d'une séparation soit par de grandes distances soit par des barrières de potentiel élevées, la distinction des particules identiques devient effectivement possible. Dans de telles situations, il est bel et bien possible

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de faire des mesures qui permettent de suivre les particules indépendamment (comme nous le faisons au cours de notre expérience quotidienne). Autrement dit, nous pouvons spécifier une énergie limite à partir de laquelle la symétrie de permutation des objets ou des particules, séparées par une distance d, devient importante. Elle est donnée par

$$E = \frac{c\,\hbar}{d} \,. \tag{59}$$

Défi 97 f Êtes-vous capable de confirmer cette expression? Par exemple, aux températures ambiantes, nous *pouvons* distinguer des atomes les uns des autres à l'intérieur d'un solide, parce que l'énergie ainsi calculée est bien plus élevée que l'énergie thermique des atomes. Pour vous divertir, vous pouvez essayer de déterminer à partir de quelle énergie
Défi 98 f deux vrais jumeaux parfaitement identiques deviennent indistinguables. L'estimation de l'énergie à partir de laquelle le caractère statistique des arbres et des réfrigérateurs deviendrait apparent est alors assez simple.

Pour résumer, dans la vie quotidienne nous pouvons distinguer les objets, et donc les gens, pour deux raisons: parce qu'ils sont constitués de *nombreuses* parties, et parce que nous vivons dans un environnement de *faible énergie*. L'image du renflement pour les particules exprime l'idées que la distinguabilité existe pour les objets du quotidien, mais pas pour les particules du domaine microscopique.

La question de l'énergie apporte immédiatement un nouvel aspect à la discussion. Comment pouvons-nous décrire les fermions et les bosons en présence de particules virtuelles et d'antiparticules?

L'indistinguabilité en théorie quantique des champs

La théorie quantique des champs, comme nous le verrons dans le prochain volume, ne fait que mettre l'idée du renflement nuageux de la Figure 60 en langage mathématique. Une situation sans renflement s'appelle un *état de vide*. La théorie quantique des champs décrit toutes les particules d'un type donné comme des *excitations* d'un champ fondamental unique. Les particules sont indistinguables parce que chacune d'elle est une excitation d'un même substrat fondamental, et que chaque excitation a les mêmes propriétés. Une situation ne comportant qu'une seule particule est alors décrite par un état de vide sur lequel agit un *opérateur de création*. L'ajout d'une seconde particule est décrit en ajoutant un deuxième opérateur de création, et la soustraction d'une particule en ajoutant un *opérateur d'annihilation*, le second se trouvant être l'opérateur adjoint du premier.

La théorie quantique des champs étudie comment les opérateurs de création et d'annihilation doivent se comporter pour décrire ce que l'on observe.* Elle est arrivée aux conclusions suivantes:

* Chaque fois que la relation

$$[b, b^\dagger] = bb^\dagger - b^\dagger b = 1 \tag{60}$$

est valable entre l'opérateur de création $b^\dagger$ et l'opérateur d'annihilation b, les opérateurs décrivent un *boson*. La dague peut ainsi être vue comme décrivant l'opération consistant à transformer un opérateur en son adjoint. Une double dague est équivalente à aucune dague. Si les opérateurs de création et d'annihilation de particules anti-commutent

$$\{d, d^\dagger\} = dd^\dagger + d^\dagger d = 1 \tag{61}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

— Les opérateurs de champs pour des particules de spin demi-entier sont des fermions et implique l'anti-commutation (locale).
— Les opérateurs de champs pour des particules de spin entier sont des bosons et implique la commutation (locale).
— Pour tous les opérateurs de champs, le commutateur (respectivement l'anti-commutateur) pris en deux points ayant des séparations de genre espace, s'annule.
— Les antiparticules de fermions sont des fermions, et les antiparticules de bosons sont des bosons.
— Les particules virtuelles se comportent comme leurs homologues réelles par rapport à l'échange.

Ces conclusions sont à la base de la théorie quantique des champs. Elles décrivent comment les quantons se comportent au cours d'une permutation.

Mais pourquoi les particules quantiques sont-elles identiques? Pourquoi tous les électrons sont-ils identiques? Guidé par les expériences, la théorie quantique des champs décrit les électrons comme des excitations identiques du vide, et donc comme étant identiques par construction. Bien sûr, cette réponse n'est pas vraiment satisfaisante. Nous n'en trouverons une meilleure que lors de la dernière partie de notre ascension de la montagne.

Avec quelle précision la symétrie de permutation est-elle vérifiée?

Les électrons sont-ils des fermions *parfaits*? En 1990, une expérience simple mais efficace
Ref. 78 a été réalisée par Ramberg et Snow pour tester leur comportement de fermions. Ils ont fait circuler un courant électrique de 30 A dans un fil de cuivre pendant un mois et ils ont cherché s'il en résultait des émissions de rayons X. Ils n'en ont trouvé aucune. Ils en conclurent que les électrons étaient toujours dans un état antisymétrique, avec une fraction de composante symétrique représentant moins de

$$2 \cdot 10^{-26} \tag{62}$$

de l'état total. En bref, les électrons sont toujours dans un état antisymétrique, ce sont des fermions.

Le raisonnement derrière cette expérience élégante est le suivant. Si les électrons n'étaient pas toujours des fermions, un électron pourrait tomber de temps en temps dans le niveau d'énergie le plus bas d'un atome de cuivre, conduisant à l'émission d'un rayon X. L'absence de tels rayons X implique que les électrons sont des fermions avec un très grand niveau de confiance. Des rayons X ne pourraient être émis que si les électrons étaient des bosons, au moins une partie du temps. En effet, deux électrons, étant des fermions, ne peuvent pas être dans le même état quantique: cette restriction s'appelle le *principe d'exclusion de Pauli*. Ce principe s'applique à tous les fermions et il fait l'objet du chapitre suivant.

ils décrivent un *fermion*. Le couple d'accolades ainsi défini s'appelle un *anti-commutateur*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les copies, les clones et les gants

Les systèmes classiques peuvent-ils être indistinguables? Ils le peuvent: les grosses molécules en sont des exemples, pourvu qu'elles soient constituées exactement des mêmes isotopes. Les *gros* systèmes classiques, composés d'une mole de particules ou plus, peuvent-ils être indistinguables? Cette question simple pose effectivement la question de savoir si une copie *parfaite* (un *clone* physique) d'un système physique est possible.

On pourrait argumenter que n'importe quelle usine de production de masse, telle qu'une usine de boutons de chemise ou encore de trombones, démontre que les copies sont possibles. Mais l'apparence est trompeuse. Lorsque l'on regarde à l'aide d'un microscope il y a en général des différences. Est-ce toujours le cas? En 1982, le physicien hollandais Dennis Dieks et, indépendamment, les physiciens des États-Unis Wootters et Zurek, ont publié des preuves simples que les systèmes quantiques ne pouvaient pas être copiés. C'est le célèbre *théorème de l'impossibilité du clonage quantique*.

Ref. 79

Un *duplicateur* est une machine qui prend un original, lit ses propriétés et produit une copie, laissant l'original inchangé. Cette définition semble simple. Cependant, nous savons que lorsque l'on extrait une information d'un original, nous devons interagir avec lui. Par conséquent, le système changera au moins d'un quantum d'action. Nous devons donc nous attendre à ce que les copies et les originaux ne puissent jamais être identiques, à cause de la théorie quantique.*

La théorie quantique montre en effet que les duplicateurs sont impossibles. Un duplicateur est décrit par un opérateur qui reproduit l'état d'un système original sur l'état de la copie. Autrement dit, un duplicateur est linéaire. Cette linéarité pose un problème. Simplement dit, si un duplicateur était capable de copier des originaux soit dans l'état $|A\rangle$ soit dans l'état $|B\rangle$, alors il ne pourrait pas fonctionner si l'état de l'original était une superposition $|A\rangle + |B\rangle$. Voyons pourquoi.

Un duplicateur est un dispositif décrit par un opérateur U qui change l'état de départ $|s\rangle_c$ de la copie, de la façon suivante:

— Si l'original se trouve dans l'état $|A\rangle$, le duplicateur agit sur la copie $|s\rangle_c$ suivant

$$U|A\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c \,. \tag{63}$$

— Si l'original se trouve dans l'état $|B\rangle$, le duplicateur agit sur la copie $|s\rangle_c$ suivant

$$U|B\rangle|s\rangle_c = |B\rangle|B\rangle_c \,. \tag{64}$$

En conséquence de ces deux exigences, un original dans l'état $|A + B\rangle$ serait traité par le duplicateur selon

$$U|A + B\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c + |B\rangle|B\rangle_c \,. \tag{65}$$

* Ceci semble fournir une solution pour éliminer la contrefaçon des billets de banque. En fait, Stephen Wiesner proposa d'utiliser la théorie quantique dès 1970. Il imagina d'utiliser la polarisation de photons individuels comme les bits des numéros de série. Pouvez-vous expliquer pourquoi cela ne peut pas marcher?

Ref. 80
Défi 99 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ceci est en contradiction avec ce que nous voulons et qui devrait être

$$U_{\text{voulu}}|A+B\rangle|s\rangle_c = (|A\rangle + |B\rangle)(|A\rangle_c + |B\rangle_c) \,. \tag{66}$$

Autrement dit, un duplicateur ne peut pas complètement copier un état.* Ceci est ce que l'on appelle le *théorème de l'impossibilité du clonage quantique*.

L'impossibilité de faire des copies est implicite en théorie quantique. Si nous étions capables de cloner des systèmes, nous pourrions mesurer une variable d'un système et une seconde variable sur sa copie. Nous serions donc capables de surmonter la relation d'indétermination dans chacune des copies. Ceci est impossible. En bref, les copies sont toujours imparfaites.

L'absence de duplicateur en mécanique quantique est décevante. De telles machines de science-fiction pourraient être alimentées par deux entrées différentes, telles qu'un lion et une chèvre, et produire une superposition: une chimère. La théorie quantique montre que tous ces êtres ou ces situations imaginaires ne peuvent pas se matérialiser.

D'autres chercheurs ont alors exploré jusqu'à quel niveau de perfection il était pos-
Ref. 81 sible de faire des copies, particulièrement dans le cas de systèmes classiques. Pour faire court, ces investigations montrent que la duplication (le clonage) des systèmes macroscopiques est également impossible. Plus simplement, les *duplicateurs n'existent pas*. Les copies peuvent toujours être distinguées des originaux si les observations sont réalisées avec suffisamment de soin. En particulier, c'est le cas pour les clones biologiques. Les clones biologiques sont des vrais jumeaux qui seraient nés à la suite de deux grossesses séparées. Ils diffèrent par leurs empreintes digitales, par l'analyse de leurs iris, par leurs souvenirs physiques et émotionnels, par la structure de leur cerveau, et par de nom-
Défi 100 e breux autres aspects. (Pouvez-vous en spécifier quelques autres?) En bref, les clones biologiques, comme les vrais jumeaux, ne sont pas des copies les uns des autres.

En résumé, les objets de la vie quotidienne, tels que les photocopies, les boules de billard ou les jumeaux sont toujours distinguables. Il y a deux raisons à cela: premièrement, les effets quantiques ne jouent aucun rôle dans la vie quotidienne, de sorte qu'il n'y a pas de danger qu'un échange inobservable se produise; deuxièmement, les clones parfaits de systèmes classiques n'existent pas de toute façon, de sorte qu'il y a toujours des différences minuscules entre deux objets quelconques, même s'ils paraissent identiques à première vue. Les *gants* étant des objets classiques, peuvent donc toujours être distingués.

Résumé

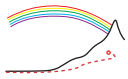
Une conséquence du quantum d'action $\hbar$ est que les particules quantiques sont *indistinguables*. Ceci se produit de l'une des deux façons suivantes: les particules sont soit des

* Le théorème de l'impossibilité du clonage quantique impose des limitations importantes sur les ordinateurs quantiques, car les calculs ont souvent besoin de copier des résultats intermédiaires. Le théorème montre également que la communication plus rapide que la lumière est impossible lors des expériences EPR. En revanche, la *cryptographie quantique* devient possible, tout du moins en laboratoire. En effet, le théorème de l'impossibilité du clonage quantique montre que personne ne peut copier un message quantique sans se faire remarquer. Les moyens spécifiques pour utiliser ce résultat en cryptographie sont le protocole Bennett-Brassard de 1984 et le protocole Ekert de 1991.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

bosons soit des fermions. Même la nature n'est pas capable de faire la distinction entre des particules quantiques identiques.

Malgré l'indistinguabilité des quantons, l'état d'un système physique ne peut pas être copié en un second système qui contiendrait les mêmes particules. Par conséquent, les clones parfaits n'existent pas dans la nature.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 6

Les rotations et les statistiques – visualiser le spin

Le spin est l'observation que les faisceaux de matière peuvent être *polarisés*: il est possible de faire tourner sur eux-mêmes les rayons de particules. Le spin décrit donc comment les particules se comportent lorsqu'elles tournent sur elles-mêmes. Ainsi, les particules quantiques ne sont pas simplement comme des points, elles peuvent tourner autour d'un axe. Cette rotation propre s'appelle le *spin*. Et comme pour la rotation des objets macroscopiques, le spin se décrit à l'aide d'un moment cinétique.

Page 116

Dans ce qui suit, nous allons rappeler que le spin des quantons est quantifié en unités de $\hbar/2$. Ensuite nous montrerons un résultat fondamental: la valeur du spin détermine si une particule quantique, ainsi que tout système quantique en général, est un boson ou un fermion. Et nous montrerons que le spin correspond à la rotation des quantons.

Les particules quantiques et la symétrie

Ref. 82

Le contexte général qui a permis l'apparition du spin a été clarifié par Eugene Wigner en 1939.** Il commença par rappeler que toute particule quantique, pour être *élémentaire*, doit se comporter comme une *représentation irréductible* de l'ensemble de tous les changements de points de vue. Cet ensemble des changements de points de vue forme le groupe de symétrie de l'espace-temps plat, que l'on appelle le *groupe de Lorentz inhomogène* (parfois appelé groupe de Lorentz affine ou encore *groupe de Poincaré* [N.d.T.]). Pourquoi?

Vol. I, page 266

Nous avons vu au chapitre sur la symétrie, dans le premier volume de cette aventure, que la symétrie de n'importe quel système composite conduisait à certaines exigences sur les constituants du système. Si les constituants ne suivent pas ces exigences, ils ne peuvent pas former un composite symétrique.

Nous savons, d'après notre expérience quotidienne, confirmé par des expériences de précision, que tous les systèmes physiques sont symétriques par rapport à une translation dans le temps et dans l'espace, par rapport à une rotation dans l'espace, par rapport à une poussée de Lorentz et (dans beaucoup de cas) par rapport à une réflexion miroir, à un échange de matière/antimatière et à une inversion du mouvement. Nous connaissons ces symétries car nous les rencontrons dans notre vie quotidienne. Par exemple, l'utilité de ce que nous appelons une «expérience» dans la vie quotidienne est simplement une conséquence de la symétrie de translation dans le temps. L'ensemble de toutes ces symé-

** Eugene Wigner (Budapest, 1902 – Princeton, 1995), physicien théoricien. Il reçut le prix Nobel de physique en 1963. Il a écrit plus de 500 articles, dont un grand nombre sur les différents aspects de la symétrie de la nature. Il était également célèbre pour être le physicien le plus poli au monde.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tries courantes (ou plus précisément, de toutes ces transformations de symétrie) s'appelle le *groupe de Lorentz inhomogène*.

Ces *symétries*, c.-à-d. ces changements de points de vue, conduisent à certaines exigences pour les constituants des systèmes physiques, c.-à-d. pour les particules quantiques élémentaires. En langage mathématique, ces exigences s'expriment en disant que les *particules élémentaires* doivent être des *représentations irréductibles* du groupe de symétrie.

Vol. I, page 266

Tous les manuels de théorie quantique détaillent systématiquement ce raisonnement. En partant du groupe de Lorentz, on obtient une liste de toutes les représentations irréductibles possibles. Autrement dit, on obtient une liste de tous les comportements possibles pour les particules élémentaires.* Lorsque l'on inventorie les possibilités, on trouve tout d'abord que toute particule élémentaire est décrite par un *quadrivecteur impulsion-énergie* (rien de nouveau jusqu'ici), par un moment cinétique interne (le *spin*) et par un ensemble de *parités*.

— Le quadrivecteur impulsion-énergie résulte de la symétrie de translation de la nature. La valeur du quadrivecteur impulsion-énergie décrit comment une particule se comporte lors d'une translation, c.-à-d. lors d'un décalage spatial ou temporel des points de vue. La norme du quadrivecteur impulsion-énergie est une propriété invariante, donnée par la masse, alors que son orientation dans l'espace-temps est libre.
— Le spin résulte de la symétrie de rotation de la nature. La valeur du spin décrit comment un objet se comporte au cours d'une rotation en trois dimensions, c.-à-d. lors d'un changement d'orientation des points de vue.** La grandeur du spin est une propriété invariante, et son orientation a plusieurs possibilités par rapport à la direction du mouvement. En particulier, le spin des particules quantiques massiques se comporte différemment de celui des particules quantiques sans masse.

  Pour les particules quantiques *massiques*, le groupe de Lorentz inhomogène implique que l'amplitude invariante du spin est $\sqrt{J(J+1)}\,\hbar$, souvent écrite J, par excès de simplification. Il est donc coutumier de dire et d'écrire «spin J», plutôt que de s'encombrer de «spin $\sqrt{J(J+1)}\,\hbar$». Puisque la valeur du nombre quantique J spécifie la grandeur du moment cinétique, elle donne la représentation d'un type de particule donné lors des rotations. Des explorations ont montré que le nombre quantique de spin J pouvait être n'importe quel multiple de $1/2$, c.-à-d. qu'il pouvait prendre les valeurs $0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2$, etc. Comme il est résumé dans le Tableau 4, les expériences montrent que les électrons, les protons et les neutrons sont de spin $1/2$, les particules W et Z sont de spin 1, et les atomes d'hélium sont de spin 0. De plus, la représentation du spin J est de dimension $2J + 1$, ce qui signifie que l'orientation spatiale du spin a $2J + 1$ valeurs possibles. Pour les électrons, puisque $J = 1/2$, il y a donc deux possibilités, que l'on appelle habituellement «up» et «down».*** Le spin

* Pour avoir une pertinence physique en théorie quantique, les représentations doivent être *unitaires*. La liste complète des représentations *irréductibles* et *unitaires* des changements de points de vue fournit donc l'éventail des possibilités pour toute particule qui se veut *élémentaire*.

** Le groupe des rotations physiques est également appelé SO(3), car sur le plan mathématique il est décrit par le groupe spécial orthogonal des matrices 3 par 3.

*** On conservera dans tout le texte les termes anglais «up» et «down» pour désigner les deux valeurs du spin de l'électron, car ils sont plus souvent utilisés que leurs traductions françaises «haut» et «bas» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

ne prend donc que des valeurs *discrètes*. Ceci contraste avec la quantité de mouvement, pour laquelle les représentations sont de dimension infinie et dont les valeurs possibles forment un *continuum*.

Les particules quantiques *sans masse* sont, elles aussi, caractérisées par la valeur de leur spin, qui peut prendre les mêmes valeurs que dans le cas des particules massiques. Par exemple, les photons et les gluons sont de spin 1. En ce qui concerne les particules sans masse, contrairement aux particules massiques, leurs représentations sont toujours de dimension 1, de sorte qu'elles sont entièrement décrites par leur *hélicité*, définie comme la projection du spin sur la direction du mouvement. Les particules sans masse peuvent avoir une hélicité positive ou une hélicité négative, que l'on appelle parfois polarisation droite et polarisation gauche. Il n'y a pas d'autre liberté pour l'orientation du spin pour le cas des particules sans masse.

— Pour compléter la liste des propriétés des particules, il nous faut y inclure les autres symétries discrètes du groupe de Lorentz inhomogène. Puisque l'*inversion de mouvement*, la *parité spatiale* et l'*inversion de charge* sont des parités, chaque particule élémentaire doit être décrite à l'aide de trois nombres supplémentaires, que l'on appelle T, P et C, chacun d'entre eux ne pouvant prendre que les valeurs +1 ou −1. Étant des parités, ces nombres doivent être *multipliés* pour fournir les valeurs correspondantes dans un système composite.

En bref, les symétries de la nature conduisent à la classification de toutes les particules quantiques élémentaires par leur masse, par leur quantité de mouvement, par leur spin et par leurs parités P, C et T.

Les types de particules quantiques

Les valeurs de spin que l'on observe pour toutes les particules quantiques de la nature sont données dans le Tableau 4. Les parités, ainsi que toutes les autres propriétés connues des particules élémentaires sont données dans le Tableau 5. Le spin et les parités constituent ensemble ce que l'on appelle les *nombres quantiques*. Toutes les autres propriétés intrinsèques des quantons sont liées aux interactions. Ce sont par exemple la masse, la charge électrique ou l'isospin, et nous les explorerons dans le prochain volume.

Vol. V, page 162

TABLEAU 5 Les propriétés des particules élémentaires.

Particule	Masse m [a]	Durée de vie τ ou largeur de la bande d'énergie, [b] principaux modes de désintégration	Isospin I, spin J, [c] parité P, parité de charge C	Charge, isospin, étrangeté, charme, beauté, [d] vérité: $QISCBT$ [e]	Nombre leptonique & baryonique [f] $L\,B$
Rayonnement élémentaire (bosons)					
photon γ	0 ($<10^{-53}$ kg)	stable	$I(J^{PC}) = 0,1(1^{--})$	000000	0, 0

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 5 (Continuation) Les propriétés des particules élémentaires.

PARTICULE	MASSE m [a]	DURÉE DE VIE τ OU LARGEUR DE LA BANDE D'ÉNERGIE, [b] PRINCIPAUX MODES DE DÉSINTÉGRATION	ISOSPIN I, SPIN J, [c] PARITÉ P, PARITÉ DE CHARGE C	CHARGE, ISOSPIN, ÉTRANGETÉ, CHARME, BEAUTÉ, [d] VÉRITÉ: $QISCBT$ [e]	NOMBRE LEPTONIQUE & BARYONIQUE [f] LB
$W^{\pm}$	$80,398(25)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$2,124(41)\,\mathrm{GeV}$ 67,60(27) % hadrons, 32,12(36) % $l^+\nu$	$J = 1$	±100000	0, 0
Z	$91,1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$2,65(2)\cdot 10^{-25}$ s ou $2,4952(23)\,\mathrm{GeV}/c^2$ 69,91(6) % hadrons, 10,0974(69) % l^+l^-	$J = 1$	000000	0, 0
gluon	0	stable	$I(J^P) = 0(1^-)$	000000	0, 0
Matière élémentaire (fermions): leptons					
électron e	$9,109\,382\,15(45)\cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg} = 81,871\,0438(41)\,\mathrm{pJ}/c^2$ $= 0,510\,998\,910(13)\,\mathrm{MeV}/c^2 = 0,000\,548\,579\,909\,43(23)\,\mathrm{u}$ rapport gyromagnétique $\mu_e/\mu_B = -1,001\,159\,652\,1811(7)$	$> 13\cdot 10^{30}$ s	$J = \frac{1}{2}$	−100 000	1, 0
muon μ	$0,188\,353\,130(11)\,\mathrm{yg}$ $= 105,658\,3668(38)\,\mathrm{MeV}/c^2 \quad = 0,113\,428\,9256(29)\,\mathrm{u}$ rapport gyromagnétique $\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu) = -1,001\,165\,9208(6)$	$2,197\,03(4)\,\mu\mathrm{s}$ 99 % $e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0
tau τ	$1,776\,84(17)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$290,6(1,0)\,\mathrm{fs}$	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0
neutrino électronique ν_e	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
neutrino muonique ν_μ	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
neutrino tauique ν_τ	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
Matière élémentaire (fermions): quarks [g]					
haut (up) u [h]	de 1,5 à 3, 3 MeV/c^2	voir proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}+\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
bas (down) d [h]	de 3,5 à 6 MeV/c^2	voir proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
étrange (strange) s [h]	de 70 à 130 MeV/c^2		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}0-1000$	$0, \frac{1}{3}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 5 (Continuation) Les propriétés des particules élémentaires.

PARTICULE	MASSE m [a]	DURÉE DE VIE τ OU LARGEUR DE LA BANDE D'ÉNERGIE, [b] PRINCIPAUX MODES DE DÉSINTÉGRATION	ISOSPIN I, SPIN J, [c] PARITÉ P, PARITÉ DE CHARGE C	CHARGE, ISOSPIN, ÉTRANGETÉ, CHARME, BEAUTÉ, [d] VÉRITÉ: $QISCBT$ [e]	NOMBRE LEPTONIQUE & BARYONIQUE [f] LB
charme (charm) c [h]	$1,27(11)\,\mathrm{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}00{+}100$	$0, \frac{1}{3}$
dessous (bottom) b [h]	$4,20(17)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$\tau = 1,33(11)\,\mathrm{ps}$	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}000{-}10$	$0, \frac{1}{3}$
dessus (top) t [h]	$171,2(2,1)\,\mathrm{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}0000{+}1$	$0, \frac{1}{3}$
Boson élémentaire observé					
boson de Higgs	$126\,\mathrm{GeV}/c^2$		$J = 0$		

Notes:
a. Voir également le tableau des préfixes SI à la page 235. Pour ce qui est de l'unité de masse eV/c^2, voir page 239.
b. La largeur de la *bande d'énergie* Γ d'une particule est liée à sa durée de vie τ par la relation d'indétermination $\Gamma\tau = \hbar$. Il y a une différence entre la *demi-vie** $t_{1/2}$ et la *durée de vie* τ d'une particule: elles sont liées par la relation $t_{1/2} = \tau \ln 2$, avec $\ln 2 \approx 0,693\,147\,18$. La demi-vie est donc plus courte que la durée de vie. L'*unité de masse atomique* unifiée u est définie comme étant 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12 au repos et dans son état fondamental. On a $1\,\mathrm{u} = \frac{1}{12}m(^{12}\mathrm{C}) = 1,660\,5402(10)\,\mathrm{yg}$.
c. Pour limiter la taille du tableau, son entête ne mentionne pas explicitement la *couleur*, que l'on nomme également (de façon confuse) la charge de l'interaction forte. Elle doit être ajoutée à la liste des propriétés fondamentales des objets. Les nombres quantiques contenant le mot «parité» sont multiplicatifs. Tous les autres sont additifs. La parité P et la parité de charge C s'écrivent à l'aide d'un signe + ou d'un signe −. La parité de temps T (à ne pas confondre avec la propriété de vérité T**), qui serait mieux nommée la parité d'inversion du mouvement, est égale à CP pour toutes les particules connues. L'isospin I (ou I_Z) apparaît deux fois dans le tableau. Il n'est défini que pour les quarks haut («up») et bas («down»), ainsi que pour leurs composés, tels que le proton et le neutron. Dans la littérature on trouve également des références à la parité G, définie par $G = (-1)^{IC}$.

L'entête du tableau ne mentionne pas non plus la *charge faible* des particules. La charge faible g (l'*isospin faible* pour être plus précis) est un nombre quantique associé à tous les fermions de polarisation gauche (et à tous les anti-fermions de polarisation droite), mais à aucun des fermions

* La demi-vie s'appelle parfois la période de désintégration, ou encore la période radioactive, dans le cas des particules qui se désintègrent en émettent de la radioactivité (c.-à-d. en émettent une autre particule que l'on qualifie communément d'alpha, de beta ou de gamma) [N.d.T.].
** La lettre T pour désigner la vérité vient de l'anglais «topness», ou encore «truth» [N.d.T.]

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 4 Le spin des particules en tant que représentation du groupe des rotations.

SPIN [$\hbar$]	SYSTÈME inchangé par une rotation de	EXEMPLES MASSIQUES élémentaires	composites	EXEMPLES SANS MASSE élémentaires
0	n'importe quel angle	boson de Higgs	mésons, noyaux, atomes	aucun [a]
1/2	2 tours	e, μ, τ, q, ν_e, ν_μ, ν_τ	noyaux, atomes, molécules, radicaux	aucun, puisque même les neutrinos ont une masse mi
1	1 tour	W, Z	mésons, noyaux, atomes, molécules, grille-pains	photon γ, gluon g
3/2	2/3 de tour	aucun [a]	baryons, noyaux, atomes	aucun [a]
2	1/2 tour	aucun	noyaux	'graviton' [b]
5/2	2/5 de tour	aucun	noyaux	aucun
3	1/3 de tour	aucun	noyaux [c]	aucun
etc.[c]	etc.[c]	etc.[c]	etc.[c]	aucun n'est possible

a. La supersymétrie, une symétrie conjecturée durant le XXe siècle, prédit des particules élémentaires dans ces c tableau.
b. Le graviton n'a pas encore été observé.
c. Il existe des noyaux avec des valeurs de spin jusqu'à 101/2 et 51 (en unités de $\hbar$). Ref. 83

de polarisation droite (ni des anti-fermions de polarisation gauche). Les détails concernant la charge faible sont donnés dans la section traitant de l'interaction faible. Vol. V, page 245
d. De nos jours, la «beauté» est plus communément appelée de son nom anglais «*bottomness*», de même que la «vérité» est appelé plus communément «*topness*». Les signes des nombres quantiques S, I, C, B et T peuvent se définir de différentes façons. Dans l'attribution standard que l'on montre ici, le signe de tous les nombres quantiques qui ne s'annulent pas est donné par le signe de la charge du quark correspondant.
e Bien que les noms des nombres quantiques soient parfois francisés (comme c'est le cas dans ce tableau), la lettre qui les désigne conserve l'initiale du nom anglais: S pour «stangeness» et T pour «topness» [N.d.T.].
f. Si la supersymétrie existait, la parité R devrait être ajouté dans cette colonne. La parité R est un nombre quantique multiplicatif lié au nombre leptonique L, au nombre baryonique B et au spin J par la définition $R = (-1)^{3B+L+2J}$. Toutes les particules du modèle standard sont paires vis-à-vis de la parité R alors que leurs partenaires supersymétriques conjecturés, seraient impaires. Cependant, il est maintenant reconnu que la supersymétrie est en contradiction avec les expériences.
g. Pour une définition et une explication précise de la masse des quarks, voir à la page 233 du volume V.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

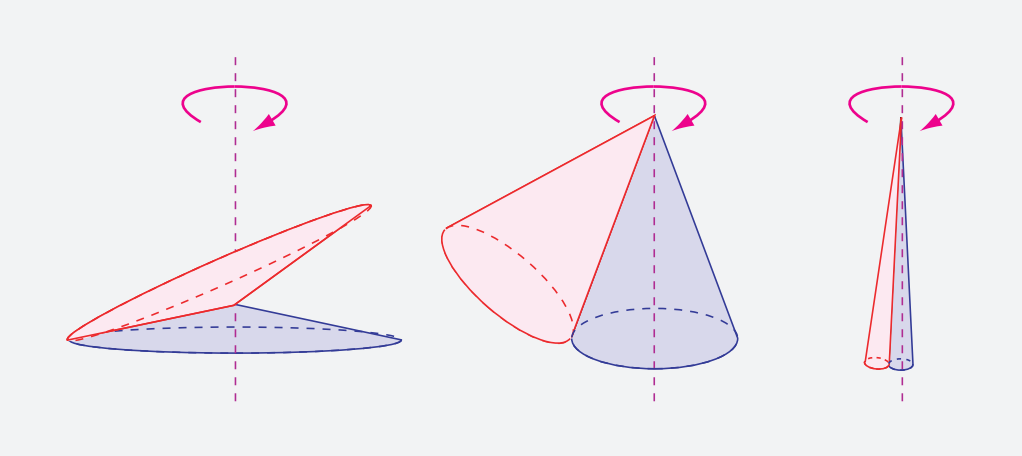


FIGURE 61 Illustration d'un argument montrant pourquoi les rotations de 4π sont équivalentes à aucune rotation (voir le texte).

h Les noms entre parenthèses sont les dénominations anglaises, que l'on rencontre souvent dans la littérature scientifique française [N.d.T.].

Le spin 1/2 et les objets attachés

Un résultat central de la théorie quantique est que le spin 1/2 soit possible dans la nature, bien que cette valeur n'apparaisse pas dans la vie quotidienne. Pour un système, avoir un spin 1/2 signifie que seule une rotation de *deux tours* est équivalente à *aucune rotation*, alors qu'une rotation d'*un seul tour* ne l'est pas. Aucun système *simple* ayant cette propriété n'existe dans la vie quotidienne, mais de tels systèmes existent dans le monde microscopique: les électrons, les neutrinos, les atomes d'argent et les radicaux moléculaires sont tous de spin 1/2. Le Tableau 4 fournit une liste plus complète.

Vol. I, page 49

Le mathématicien Hermann Weyl utilisait une image simple pour expliquer qu'une rotation de deux tours était équivalente à zéro tour alors qu'un seul tour produisait un effet différent. Prenez deux cônes se touchant par leur sommet ainsi que le long d'une ligne, comme le montre la Figure 61. Tenez un des cônes et faites rouler l'autre autour du premier. Lorsque le cône roulant, après avoir fait un tour complet autour de l'autre cône (c.-à-d. autour de l'axe vertical) est revenu à sa position initiale, il a tourné sur lui-même d'un certain angle. Si les cônes sont largement ouverts, comme ceux de gauche, l'angle de rotation final sera petit. À la limite, pour des cônes extrêmement ouverts, il n'y aura pas de rotation du tout. Si les cônes sont très fins, comme des aiguilles, le cône roulant aura tourné sur lui-même de (presque) 720 degrés. Cette situation est identique à celle d'une pièce de monnaie roulant autour d'une autre pièce ayant la même taille, toutes les deux étant posées sur une table. La pièce roulante tourne sur elle-même de deux tours, donc de 720 degrés. Dans ce cas, l'angle de rotation final est également petit. Le résultat pour 0 degré ou pour 720 degrés est donc le même. Si on s'imagine l'angle du cône variant de façon continue, on s'aperçoit qu'il est possible de passer de façon continue d'une rotation de 0 degré à une rotation de 720 degrés. Au contraire, une rotation de 360 degrés *ne peut pas* être «défaite» de cette façon.

Défi 101 f

Défi 102 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

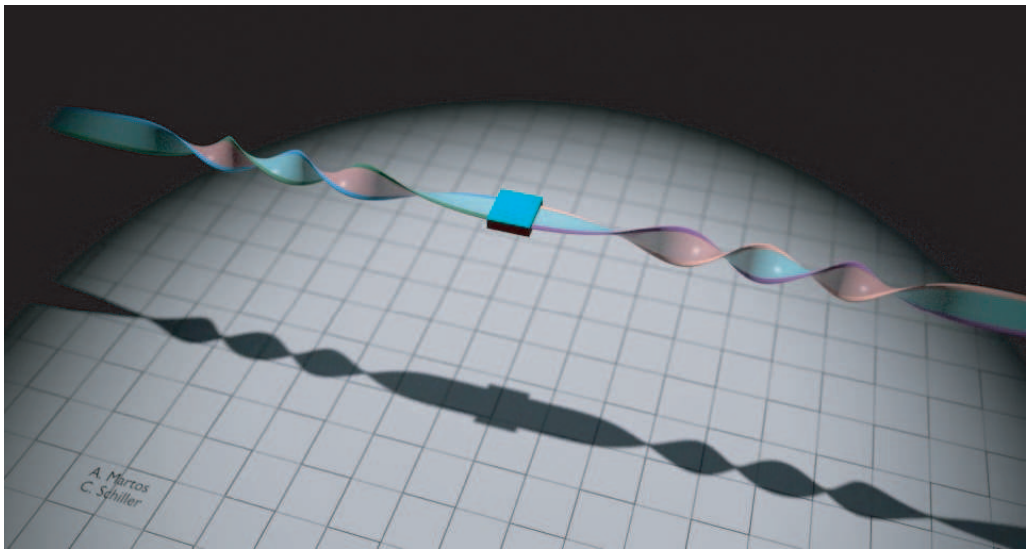


FIGURE 62 Supposez que la ceinture ne puisse pas être observée, mais que l'objet carré le puisse, et qu'il représente une particule. L'animation montre alors qu'une telle particule (l'objet carré) peut retourner à la position de départ après une rotation de 4π (mais pas après une rotation de 2π). Une telle particule «ceinturée» satisfait donc à la propriété définissant une *particule de spin* $1/2$: une rotation de 4π est équivalente à aucune rotation. La ceinture représente donc la fonction d'onde d'un spineur. Par exemple, une rotation de 2π entraine un mouvement de torsion, ce qui signifie un changement du signe de la fonction d'onde. Une rotation de 4π n'a pas d'influence sur la fonction d'onde. Vous pouvez répéter le tour chez vous avec une bande de papier. L'équivalence est montrée ici avec deux ceintures attachées, mais le tour marche avec un nombre quelconque de ceintures! (Film QuickTime © Antonio Martos)

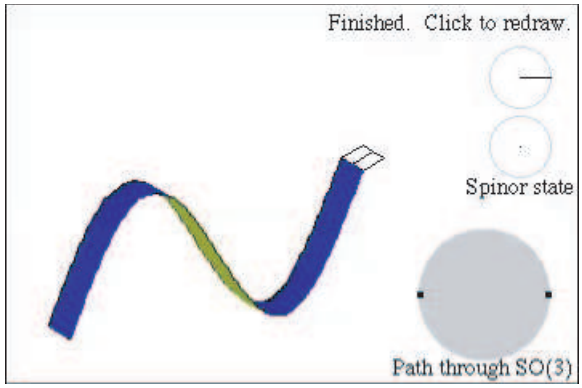


FIGURE 63 Le tour de la ceinture avec une ceinture simple: une rotation de deux tours de la boucle de la ceinture équivaut à aucune rotation. (Film QuickTime © Greg Egan)

Il existe des systèmes de la vie quotidienne qui se comportent comme le spin 1/2, mais ils ne sont pas simples: tous ces systèmes sont *attachés*. Le système le plus connu est la ceinture. La Figure 62 et la Figure 63 montrent qu'une rotation de 4π de la boucle d'une ceinture est équivalente à aucune rotation: on peut y arriver simplement en faisant

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

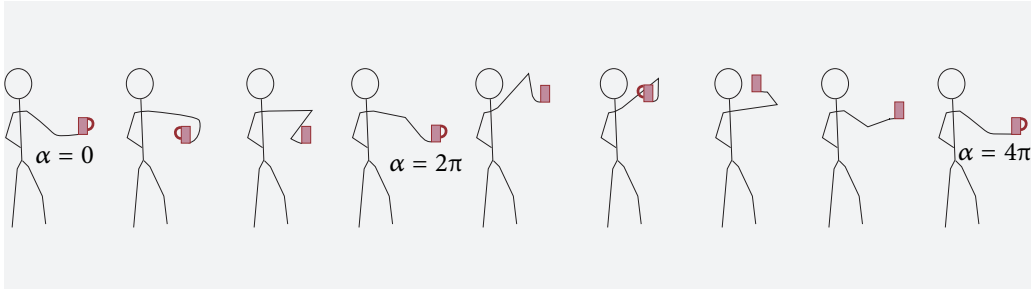


FIGURE 64 Le bras humains sert de modèle pour le spin 1/2.

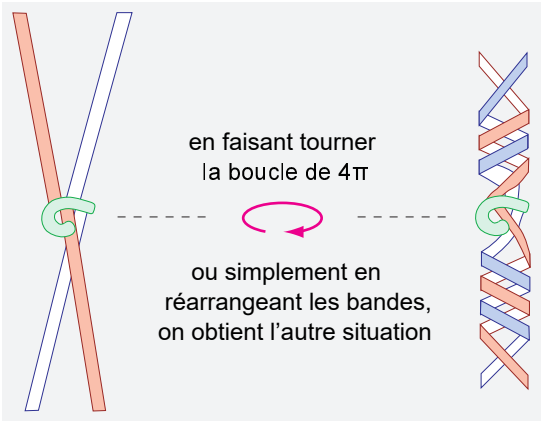


FIGURE 65 La généralisation du tour de la ceinture modélise le comportement de rotation d'une particule de spin 1/2: indépendamment du nombre de bandes, de tubes ou de ficelles attachés, les deux situations peuvent être transformées l'une en l'autre, soit en faisant tourner l'objet central de 4π, soit en gardant l'objet central fixe et en déplaçant les bandes autour de lui.

se déplacer la ceinture. Vous voudriez peut-être répéter le processus par vous-même, en
Défi 103 f utilisant une ceinture réelle, ou une bande de papier, afin de vous en faire une idée. Le processus de démêlage est souvent appelé le tour (l'astuce [N.d.T.]) de la ceinture, mais également le *tour des ciseaux*, le *tour de l'assiette*, le *tour des ficelles*, la *danse du vin des Philippines* ou la *danse des bougies balinaises*. Il est parfois attribué à tort à Dirac, parce qu'il l'utilisait souvent lors de ses cours.

Le corps humain possède en lui-même une telle ceinture: le *bras*. Prenez simplement votre main, placez un objet dessus pour plus de clarté (une tasse par exemple) et faite tourner votre main et l'objet de 2π en tordant votre bras. Après une deuxième rotation, le système sera de nouveau entièrement démêlé, comme le montre la Figure 64. Le tour est encore plus impressionnant lorsque l'on utilise *plusieurs* bras. Vous pouvez mettre
Défi 104 f vos deux mains (si vous choisissez la bonne position de départ) sous la tasse ou vous pouvez demander à un ou deux amis de garder chacun une main attachée à la tasse en même temps que vous. Le tour de la ceinture peut encore être réalisé dans ce cas et le
Défi 105 f système se démêle après deux tours complets.

Ceci nous conduit au moyen le plus général pour montrer le lien entre l'attachement et le spin 1/2. Collez simplement un nombre quelconque de fils, de ceintures ou de tubes, disons d'un demi-mètre de long, à un objet, comme le montre la Figure 65. (Avec un tel nombre de queues, il n'est plus approprié de l'appeler une boucle de ceinture.) Chaque bande est supposée s'étendre à l'infinie et d'y être attachée. Au lieu d'être attachées à

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

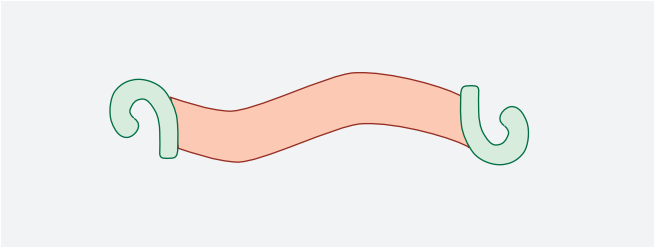


FIGURE 66 Deux boucles reliées à l'aide d'une ceinture, un moyen de visualiser deux particules de spin 1/2.

l'infini, on peut aussi imaginer que les ceintures soient attachées à un objet lointain et fixe, tout comme les bras sont attachés au corps humain. Si on fait tourner l'objet (qui représente la particule) de 2π, des torsions vont apparaître dans ses queues. Si on fait tourner l'objet d'un tour supplémentaire, pour un total de 4π, il est alors possible de faire disparaître toutes les torsions et tous les enchevêtrements, sans avoir à déplacer ou à faire tourner l'objet. Il vous faut vraiment faire l'expérience vous-même pour pouvoir le croire. Et le processus marche réellement pour un nombre *quelconque* de bandes collées à l'objet. Le site internet www.evl.uic.edu/hypercomplex/html/dirac.html fournit une animation montrant le processus avec quatre ceintures attachées.

En bref, toutes ces animations montrent que les boucles de ceintures, et en fait tous les systèmes (suffisamment) attachés, retournent dans leur état initial uniquement après des rotations de 4π, et *pas* après des rotations de seulement 2π. *Les objets attachés se comportent comme les particules de spin* 1/2. En fait, les objets attachés, telles que les boucles de ceinture, sont les *seuls* systèmes qui reproduisent les propriétés du spin 1/2.

Défi 106 f Lors de la dernière partie de notre aventure nous découvrirons les raisons sous-jacentes profondes de l'équivalence entre les particules de spin 1/2 et les systèmes attachés.

En explorant les symétries des fonctions d'onde, la théorie quantique montre que les rotations *nécessitent* l'existence d'un spin pour toutes les particules quantiques. Une investigation de la fonction d'onde montre que, lors des rotations, les fonctions d'onde des particules de matière élémentaires se comportent comme des objets attachés. Par exemple, une fonction d'onde dont l'équivalent attaché serait emmêlé acquière un signe négatif.

En résumé, la théorie quantique implique l'existence, quelque peu contre-intuitive, du spin de valeur 1/2. En particulier, il apparaît pour les particules de matière élémentaires.

L'extension du tour de la ceinture

Mais pourquoi les expériences montrent-elles que tous les fermions ont des spins demi-entiers et que tous les bosons ont des spins entiers? En particulier, pourquoi est-ce que

Page 153 les électrons obéissent au principe d'exclusion de Pauli? À première vue, le rapport entre la valeur du spin et les propriétés statistiques de la particule n'est pas clair. En fait, il y a plusieurs moyens de montrer que les rotations et les statistiques sont liées. La pre-

Ref. 86 mière démonstration, due à Wolfgang Pauli, utilisait les détails de la théorie quantique des champs et elle était si compliquée que ses ingrédients essentiels étaient cachés. Il fallut plusieurs décennies pour convaincre tout le monde qu'une observation plus approfondie

Ref. 87 concernant les ceintures était la partie centrale de la démonstration.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

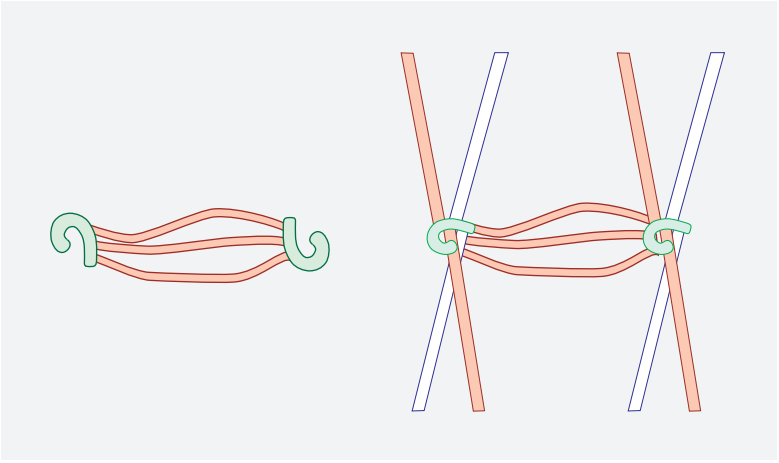


FIGURE 67 Des modèles de la ceinture étendus dans le cas de deux particules de spin 1/2.

En partant du modèle des renflements des particules quantiques, que montre la Figure 60, on peut s'imaginer un tube reliant deux particules, de la même façon qu'une ceinture relie deux boucles, tel que le montre la Figure 66. Les boucles représentent les particules. Le tube permet de suivre leur orientation relative. Si on fait tourner une particule (une boucle) de 2π autour d'un axe quelconque, une torsion est incorporée à la ceinture. Comme on vient de le montrer, si on fait tourner la même boucle de 2π supplémentaires, pour un total de 4π, la double torsion qui en résulte peut facilement être défaite sans avoir à déplacer ou à faire tourner les boucles.

Page 135

Maintenant, regardons à nouveau la Figure 66. Si on prend les deux boucles et que l'on *échange* simplement leur position, une torsion est incorporée à la ceinture. Si on les échange à nouveau, la torsion va disparaître. En bref, deux boucles de ceintures reliées retournent dans leur état initial uniquement après un double échange, et pas après un seul échange.

Autrement dit, si chaque boucle représente une particule et qu'une torsion signifie un facteur -1, la ceinture décrit exactement le comportement de la phase des fonctions d'onde de spin 1/2 lors d'une *rotation* ou lors d'un *échange*. En particulier, on voit que le comportement de la rotation et de l'échange sont liés.

D'une façon similaire, le tour de la ceinture lui-même peut être étendu à l'échange. Prenez deux boucles qui sont connectées avec de *nombreuses* bandes ou fils, comme sur la Figure 67 ou sur la Figure 68. La bande peut connecter les particules, ou se prolonger à l'infini, ou les deux. Un échange des deux boucles produit un enchevêtrement assez désordonné. Mais de façon presque incroyable, dans tous les cas, un deuxième échange ramène à la situation initiale, si les ceintures sont correctement réarrangées. Vous pourriez vouloir tester par vous-même que le comportement est également valable si des particules supplémentaires sont impliquées, tant que vous échangez la même paire de particules deux fois.

Défi 107 f

Nous en concluons que les objets attachés se comportent comme des fermions lors des échanges. Ensemble, ces observations forment le théorème spin-statistique pour les particules de spin 1/2: *le spin et le comportement lors des échanges sont liés*. En effet, ces arguments presque «expérimentaux» peuvent se formuler en langage mathématique exact

Ref. 88

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

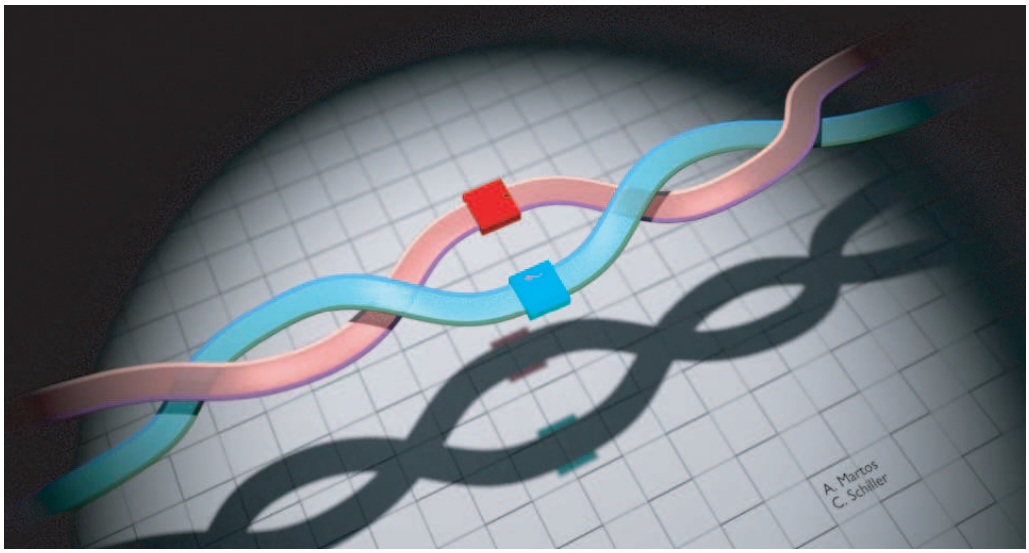


FIGURE 68 Supposez que les ceintures ne puissent pas être observées, mais que les objets carrés le puissent, et qu'ils représentent des particules. Nous avons vu plus haut que les boucles attachées à des ceintures se comportaient comme des particules de spin 1/2. L'animation montre que de telles particules retournent à leur position initiale si on permute leurs positions deux fois (mais pas près une seule permutation). De telles particules satisfont donc à la propriété définissant les *fermions*. (Dans le cas opposé, celui des bosons, un seul échange conduirait à la situation identique.) Vous pouvez reproduire le tour chez vous, en utilisant des bandes de papier. L'équivalence est démontrée ici avec deux ceintures par particule, mais le tour marche avec un nombre quelconque de ceintures attachées à chaque boucle. Cette animation est l'étape essentielle de la démonstration que les particules de spin 1/2 sont des fermions. Ceci s'appelle le *théorème spin-statistique*. (Film QuickTime © Antonio Martos)

en étudiant le comportement de l'espace!des configurations des particules. Ces investigations conduisent aux affirmations suivantes:

▷ Les objets de spin 1/2 sont des fermions.*

▷ L'échange et la rotation des particules de spin 1/2 sont deux processus similaires.

En bref, les objets qui se comportent comme des particules de spin 1/2 lors des rotations se comportent également comme des fermions lors des échanges, et vice versa. Le comportement d'échange des particules détermine leurs propriétés statistiques, alors que leur comportement de rotation détermine leur spin. En généralisant le tour de la ceinture à plusieurs boucles, chacune ayant plusieurs ceintures, nous avons donc visualisé le théorème spin-statistique pour les fermions.

Notez que tous ces arguments nécessitent trois dimensions d'espace, parce qu'il n'y

* Une observable mathématique qui se comporte comme une particule de spin 1/2 n'est ni un vecteur ni un tenseur, comme vous pourriez vouloir le vérifier. Un nouveau concept est nécessaire: une telle observable s'appelle un *spineur*. Nous l'introduirons en détail plus loin.

Défi 108 f
Page 214

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

a pas d'enchevêtrements (de nœuds) avec moins ou plus de dimensions.* Et le spin n'existe en effet que pour trois dimensions spatiales.

Le tour de la ceinture conduit à des casse-têtes intéressants. Nous avons vu qu'un objet de spin 1/2 pouvait être modélisé en imaginant qu'une ceinture que l'on étend jusqu'à l'infini y était attachée. Si nous voulons modéliser le comportement du spin avec des *ficelles* unidimensionnelles attachées au lieu de *bandes*, quel est le nombre minimum de ficelles dont on a besoin? Le casse-tête suivant est encore plus difficile: est-il possible de réaliser le tour de la ceinture si la boucle est collée à un matelas, le matelas agissant alors comme un nombre «infiniment grand» de ceintures?

Défi 109 e

Défi 110 d

Les anges, le principe d'exclusion de Pauli et la dureté de la matière

Pourquoi est-il possible de frapper à une porte? Pourquoi les pierres ne peuvent-elles pas passer à travers les troncs des arbres? Comment la montagne sur laquelle nous marchons peut-elle nous porter? Pourquoi ne pouvons-nous pas marcher à travers les murs? En physique classique, nous avons évité ce problème en considérant la solidité comme une propriété définissant la matière. Mais nous ne pouvons plus le faire: nous avons vu que la matière était constituée principalement de nuages électroniques de faible densité. Le quantum d'action nous oblige donc à *expliquer* le quantum de matière.

L'explication de l'impénétrabilité de la matière est si importante qu'elle a conduit à un prix Nobel de physique. L'interpénétration des corps est rendue impossible par le *principe d'exclusion de Pauli* qui s'applique aux électrons à l'intérieur de l'atome. Le principe d'exclusion de Pauli affirme que

▷ Deux fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique.

Toutes les expériences connues corroborent cette affirmation.

Pourquoi les électrons et les autres fermions obéissent-ils au *principe d'exclusion* de Pauli? La réponse peut être apportée par un argument beau et simple. Nous savons qu'échanger deux fermions produit un signe moins dans la fonction d'onde totale. Imaginez que ces deux fermions soient, comme le dirait un physicien classique, localisés au même endroit, ou, comme dirait un physicien quantique, dans le même état. Si cela était possible, un échange ne changerait rien au système. Mais un échange de fermions doit produire un signe moins pour l'état total. Les deux possibilités (pas d'échange du tout ainsi qu'un signe moins) ne peuvent pas se réaliser en même temps. Il n'y a qu'une issue pour s'en sortir: deux fermions doivent absolument éviter de se trouver dans le même état. Ceci constitue le principe d'exclusion de Pauli.

Ref. 89

Le principe d'exclusion est la raison pour laquelle deux morceaux de matière de la vie quotidienne ne peuvent pas s'interpénétrer, mais doivent se *repousser*. Par exemple, prenez une cloche. Une cloche ne fonctionnerait pas si les pièces qui s'entrechoquent

* Bien sûr, les nœuds et les enchevêtrements existent en dimension supérieure. Au lieu de considérer des lignes unidimensionnelles nouées, on peut considérer des plans noués ou des hyperplans de dimension supérieure noués. Par exemple, les plans déformables peuvent être noués dans un espace de dimension 4, de même que les espaces de dimension 3 déformables dans un espace de dimension 5. Cependant, les dimensions effectives qui produisent le nœud sont toujours au nombre de trois.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pour produire le son pouvaient s'interpénétrer. Mais dans n'importe quel exemple de deux objets qui s'interpénètrent, les électrons des différents atomes devraient se trouver au même endroit: ils devraient se trouver dans le même état. Ceci est impossible. Le principe d'exclusion de Pauli interdit l'interpénétration de la matière. Les cloches ne fonctionnent qu'à cause du principe d'exclusion.

Pourquoi est-ce que nous ne passons pas à travers le sol mais restons debout sur sa surface, alors même que la gravité nous tire vers le bas? De nouveau, la raison est le principe d'exclusion de Pauli. Pourquoi est-ce que le sol lui-même ne tombe pas? Il ne tombe pas parce que la matière de la Terre ne peut pas s'interpénétrer et parce qu'il n'est pas possible de rapprocher les atomes les uns des autres en dessous d'une certaine distance minimale. Autrement dit, le principe d'exclusion de Pauli implique que la matière atomique ne peut pas se compresser indéfiniment. À partir d'un certain niveau, une *pression effective de Pauli* apparaît, de sorte qu'il s'ensuit une limite à la compression. C'est pour cette raison, par exemple, que les planètes, constituées de matière atomique (ou encore les étoiles à neutrons, constituées de neutrons qui ont aussi un spin 1/2 et obéissent donc également au principe d'exclusion) ne s'effondrent pas sous l'effet de leur propre gravité.

Le principe d'exclusion est la raison pour laquelle les atomes sont des nuages électroniques *étendus* et que différents atomes ont différentes tailles. En fait, le principe d'exclusion oblige les électrons dans les atomes à former des *couches*. Lorsque les électrons sont ajoutés autour d'un noyau, et lorsqu'une couche est remplie, une nouvelle couche démarre. Ceci est à l'origine du tableau périodique des éléments.

La taille de n'importe quel atome est la taille de sa dernière couche. Sans le principe d'exclusion, les atomes seraient aussi petit qu'un atome d'hydrogène. En fait, la plupart des atomes sont considérablement plus gros. Le même argument s'applique aux noyaux: leur taille est donnée par la dernière couche de nucléons. Sans le principe d'exclusion, les noyaux seraient aussi petit qu'un seul proton. En fait, ils sont habituellement environ 100 000 fois plus gros.

Le principe d'exclusion règle également une ancienne question: combien d'*anges* peuvent danser sur la pointe d'une épingle? (Notez que les anges, le cas échéant, doivent être constitués de fermions, ce que vous pourriez vouloir déduire à partir des informations que l'on connait sur eux, et que la pointe d'une épingle est un point unique de l'espace.) La théorie et l'expérience confirment toutes les deux la réponse qu'avait déjà donnée Thomas d'Aquin au Moyen Âge: seulement *un* ange! Le principe d'exclusion des fermions pourrait donc tout aussi bien s'appeler le «principe d'exclusion des anges». Pour rester dans le même domaine, le principe montre également que les *fantômes* ne peuvent pas être des objets, car les fantômes sont supposés pouvoir passer à travers les murs.

Défi 111 e
Ref. 90

Résumons tout cela! En simplifiant quelque peu, le principe d'exclusion maintient la forme des choses qui nous entourent. Sans le principe d'exclusion, il n'y aurait pas d'objets de dimension 3. Seul le principe d'exclusion établit le diamètre des nuages atomiques, empêche ces nuages de fusionner, et les maintient à distance. Cette répulsion est à l'origine de la taille du savon, des planètes et des étoiles à neutrons. Les formes de tous les solides et de tous les liquides sont une conséquence directe du principe d'exclusion. Autrement dit, lorsque l'on frappe sur une table ou à une porte, on démontre expérimentalement que ces objets ainsi que nos mains sont constitués de fermions.

Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que les fermions de spin 1/2. Nous ne par-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

lerons pas beaucoup des particules de spin impair de valeur supérieure, telle que 3/2 ou 5/2. Ces particules peuvent toutes être vues comme étant composées d'entités de spin 1/2. Pouvez-vous le confirmer? Défi 112 f

Nous n'avons pas non plus parlé de spins plus petits que 1/2. Un théorème célèbre établit qu'une valeur de spin comprise entre 0 et 1/2 est impossible en dimension 3. Les spins plus petits sont impossibles, car le plus grand angle de rotation qui puisse être distingué et mesuré en dimension 3 est 4π. Il n'y a aucun moyen de mesurer un angle plus grand, car le quantum d'action rend cela impossible. Par conséquent, il ne peut pas y avoir de spin compris entre 0 et 1/2 dans la nature. Ref. 82

Le spin est-il une rotation autour d'un axe?

Expérimentalement, le spin d'une particule se comporte comme un moment cinétique intrinsèque, il s'additionne comme un moment cinétique, il contribue à la conservation du moment cinétique, il est décrit comme un moment cinétique, et il a un nom synonyme de moment cinétique. En dépit de tout ceci, pendant de nombreuses décennies, un mythe étrange et erroné s'était répandu dans de nombreux cours et de nombreux manuels de physique un peu partout dans le monde: «le spin 1/2, malgré son nom, n'est *pas* une rotation autour d'un axe.» Il est temps d'en finir avec cet exemple de pensée incorrecte.

Les électrons ont bien un spin 1/2 et ils ont une charge électrique. Les électrons ainsi que toutes les autres particules chargées de spin 1/2 on bien un moment magnétique.* On s'attend à un moment magnétique pour n'importe quelle charge en rotation. Autrement dit, le spin 1/2 se comporte comme une rotation. Cependant, si on suppose qu'une particule est constituée d'une distribution de charge *continue* en mouvement de rotation, on trouve une valeur erronée pour le moment magnétique. Au début du XXe siècle, alors que les physiciens pensaient toujours en termes de physique classique, ils en conclurent que les particules chargées de spin 1/2 ne pouvaient donc pas tourner. Ce mythe a survécu à travers de nombreux manuels. Mais la déduction correcte est que l'hypothèse d'une distribution continue de charge électrique est fausse. En effet, la charge est quantifiée et personne ne s'attend à ce qu'une charge élémentaire soit distribuée de façon continue dans l'espace, car cela contredirait sa quantification.

Une autre raison en défaveur du mythe est la rotation elle-même. Le mythe est basé sur une réflexion classique et il affirme que tout objet en rotation doit avoir un spin *entier*. Puisque le spin demi-entier n'est pas possible en physique classique, il est prétendu qu'un tel spin n'est pas dû à un mouvement de rotation. Mais souvenons-nous de ce qu'est une rotation. Le tour de la ceinture pour le spin 1/2, tout comme le cas du spin entier, nous rappelle que la *rotation* d'un corps autour d'un autre est une fraction ou un multiple d'un échange. Ce que nous appelons un objet tournant dans la vie quotidienne est un objet qui échange de façon continue les positions de ses constituants, et vice versa.

▷ La rotation et l'échange sont le même processus.

Or, nous venons juste de trouver que le spin était un comportement d'échange. Puisque la rotation est un échange et que le spin est un échange, il s'en suit que

* Ce moment magnétique peut facilement se mesurer à l'aide d'une expérience, bien qu'elle ne soit pas du même type que celle de Stern et Gerlach. Pourquoi pas? Défi 113 pe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Le spin *est* une rotation.

Puisque nous avons déduit le spin, comme le fit Wigner, à partir de l'invariance de la rotation, cette conclusion n'est pas une surprise. De même, le modèle de la ceinture d'une particule de spin 1/2 nous dit qu'une telle particule peut tourner de façon continue sans
Page 148 aucune entrave. De plus, le moment magnétique obtient alors sa valeur correcte. En bref, il nous est permis de soutenir que le spin est une rotation autour d'un axe, sans aucune contradiction avec les observations, même pour le spin 1/2.

En résumé, le modèle de la ceinture montre que le spin 1/2 est une sorte de rotation,
Ref. 91 tant que l'on suppose que seule la boucle peut être observée (mais pas les ceintures) et que la charge élémentaire n'est pas distribuée de façon continue dans l'espace.*

Puisque les propriétés de permutation et les propriétés de spin des fermions sont si bien décrites par le modèle de la ceinture, nous pourrions être tentés de conclure que ces propriétés sont réellement la conséquence de liens, du même type que ceux de la ceinture, entre les particules et le monde extérieur. Il se pourrait que, pour certaines raisons, nous n'observions que les boucles, mais pas les ceintures elles-mêmes. Dans la dernière partie de cette promenade, nous découvrirons si cette idée est correcte ou non.

La rotation a besoin des antiparticules

Le lien entre la rotation et les antiparticules est peut-être la conclusion la plus étonnante des expériences montrant l'existence du spin. Jusqu'à présent, nous avons vu que la rotation nécessitait l'existence du spin, que le spin apparaissait lorsque la relativité était
Vol. II, page 72 introduite dans la théorie quantique, et que la relativité avait besoin de l'antimatière. Si on considère ces trois affirmations dans leur ensemble, la conclusion du titre n'est plus une surprise: la rotation a besoin des antiparticules. Il est intéressant de noter qu'il existe un argument simple qui permette d'arriver à la même conclusion avec le modèle de la ceinture, si on le généralise de l'espace seul à l'*espace-temps* complet.

Pour apprendre comment penser en termes d'espace-temps, prenons une particule et limitons-la à deux petites queues, de sorte que la particule soit un petit segment de droite. Lorsqu'elle se déplace dans un espace-temps de dimension 2 + 1, la particule
Défi 114 pe est décrite par un ruban. Jouer avec des rubans dans l'espace-temps, au lieu de ceintures dans l'espace, fournit de nombreuses conclusions intéressantes. Par exemple, la Figure 69 montre qu'enrouler un ruban de caoutchouc autour des doigts permet de montrer, une nouvelle fois, qu'une rotation d'un corps de 2π, en présence d'un deuxième corps, est la même chose qu'échanger les positions des deux corps.** Les deux faces de la main transforment la même condition initiale, le long d'un des bords de la main, en la même condition finale, le long de l'autre bord. Nous avons donc étendu avec succès un résultat, déjà connu dans le cas de l'espace seul, à l'espace-temps: la rotation et l'échange sont équivalents.

* De toute évidence, la structure exacte de l'électron demeure *floue* à ce stade. En physique classique, tout moment cinétique S est donné par $S = \Theta\omega$. Pourtant, à ce stade, ni le moment d'inertie Θ, qui est lié au rayon de rotation et à la masse de l'électron, ni la vitesse angulaire ω ne sont connus. Nous allons devoir attendre un peu, jusqu'à la dernière partie de notre aventure, pour en découvrir plus.

** De toute évidence, le raisonnement complet nécessiterait de vérifier l'intégralité du modèle du spin 1/2 de
Défi 115 pe la Figure 65 avec les quatre dimensions de l'espace-temps. Mais ceci n'est pas une tâche facile et il n'existe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

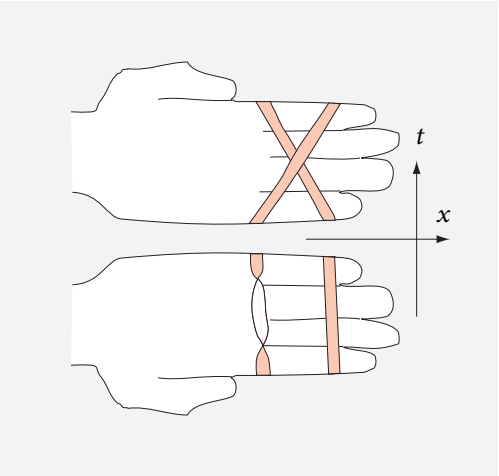


FIGURE 69 L'équivalence entre l'échange et la rotation dans l'espace-temps.

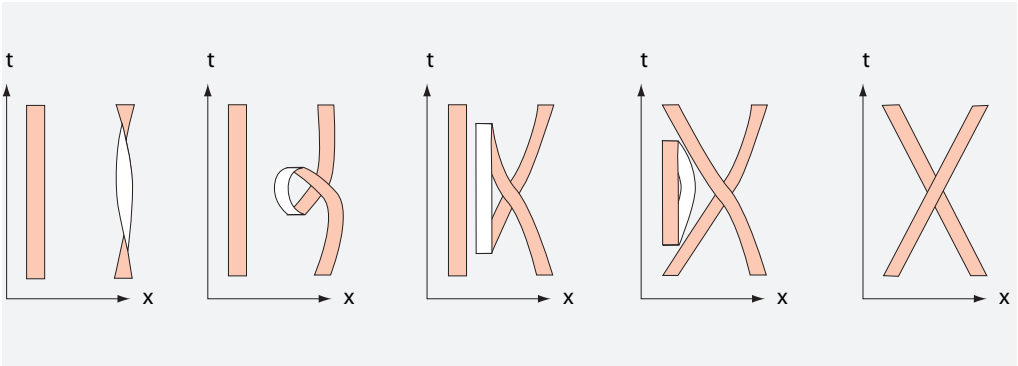


FIGURE 70 Les ceintures dans l'espace-temps: la rotation et les antiparticules.

Si vous pensez que la Figure 69 n'est pas une explication satisfaisante, vous avez raison. Une explication plus satisfaisante doit comporter une séquence continue d'étapes, réalisant l'équivalence entre la rotation et l'échange. C'est ce que montre la Figure 70. On suppose que chaque particule est décrite par un segment. Sur la figure, les deux segments sont placés horizontalement. Le diagramme le plus à gauche montre deux particules: une au repos et une qui tourne de 2π. La déformation du ruban montre que ce processus est équivalent à l'échange de position de deux particules, ce que montre le diagramme le plus à droite.

Mais le point essentiel est fourni par les diagrammes intermédiaires. Nous notons que la séquence montrant l'équivalence entre la rotation et l'échange nécessite l'utilisation d'une boucle. Mais une telle boucle dans l'espace-temps décrit l'apparition d'une paire particule-antiparticule! Autrement dit, sans les antiparticules, l'équivalence entre la rotation et l'échange ne tiendrait pas. En bref, la rotation dans l'espace-temps nécessite l'existence des antiparticules.

pas encore de bonne représentation pour le visualiser.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

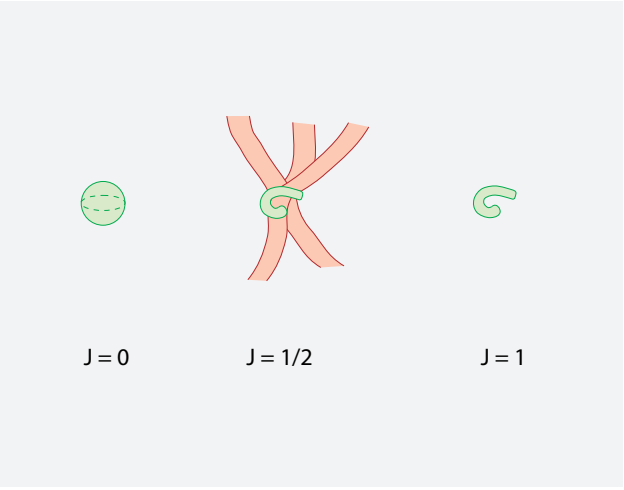


FIGURE 71 Quelques visualisations de représentations du spin.

POURQUOI EST-IL IMPOSSIBLE DE FAIRE DE L'ESCRIME AVEC DES FAISCEAUX LASER?

Lorsqu'une épée s'approche dangereusement, il est possible de l'arrêter avec une deuxième épée. De nombreux films anciens utilisent de telles scènes. Lorsqu'un faisceau laser s'approche, il est impossible de le repousser avec un deuxième faisceau, contrairement à tout ce que nous montrent les films de science-fiction. Frapper deux faisceaux laser l'un contre l'autre est impossible. L'explication du théorème spin-statistique que l'on a détaillée plus haut, nous montre pourquoi.

Les électrons de l'épée sont des fermions et ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli. Les fermions rendent la matière impénétrable. En revanche, les photons d'un faisceau laser sont des bosons. Deux bosons *peuvent* se trouver dans le même état et permettent donc l'interpénétration. La matière est impénétrable parce qu'*elle est constituée de fermions* à son niveau fondamental. Le rayonnement est composé de bosons et les faisceaux lumineux peuvent donc se croiser les uns les autres. C'est donc la distinction entre les fermions et les bosons qui explique pourquoi il est possible de toucher les objets alors qu'il n'est pas possible de toucher les images. Au cours de la première étape de notre ascension de la montagne, nous avons commencé par noter cette différence. Nous connaissons maintenant son origine.

Vol. I, page 98

LE SPIN, LES STATISTIQUES ET LES OBJETS COMPOSITES

Lors des rotations, les particules de spin entier se comportent différemment des particules de spin demi-entier. Les particules de spin entier ne présentent pas de changements de signe étranges lors des rotations de 2π. Dans la visualisation à l'aide des ceintures, les particules de spin entier n'ont pas besoin d'être attachées par des ficelles. En particulier, une particule de spin 0 correspond de toute évidence à une sphère. Des modèles pour d'autres valeurs de spin importantes sont représentées sur la Figure 71. En explorant leurs propriétés de la même façon que nous l'avons fait ci-dessus, on aboutit au *théorème spin-statistique* complet:

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ L'échange et la rotation des objets sont des processus similaires.

▷ Les objets de spin demi-entier sont des fermions. Ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli.

▷ Les objets de spin entier sont des bosons.

Défi 116 f Vous pourriez démontrer par vous-même que ceci suffit à établir la règle suivante:

▷ Les composites de bosons, de même que les composites ayant un nombre pair de fermions (à faible énergie) sont des bosons. Les composites ayant un nombre impair de fermions sont des fermions*

Ces liens expriment les caractéristiques fondamentales du monde tridimensionnel dans lequel nous vivons. À quelle classe de particules est-ce que les balles de tennis, les gens, Défi 118 e les arbres, les montagnes et tous les autres objets macroscopiques appartiennent-ils?

La taille et la densité de la matière

Les trois dimensions d'espace ont de nombreuses conséquences pour les systèmes physiques. Nous savons que toute matière est constituée de fermions, tels que des électrons, des protons et des neutrons. Le principe d'exclusion a une conséquence intéressante en ce qui concerne les systèmes composés de N fermions *identiques*: de tels systèmes obéissent à l'expression suivante entre leur quantité de mouvement p et leur taille l:

$$\Delta p \, \Delta l \gtrsim N^{1/3} \hbar \,. \tag{67}$$

Défi 119 f Pouvez-vous dériver cette expression? Cette *relation d'indétermination étendue* four-
Ref. 92 nit un moyen simple pour estimer la taille des systèmes matériels. En particulier elle implique que l'énergie moyenne par quanton augmente avec la densité de quantons. Défi 120 f Pouvez-vous le montrer?

La relation d'indétermination étendue implique que les systèmes matériels dont la taille est due aux électrons (ce sont donc tous les systèmes de matière condensée) ont essentiellement des densités de matière et d'énergie similaires. La relation d'indétermination étendue implique également que les noyaux, qui sont composés de protons et de neutrons, ont tous essentiellement la même densité de matière.

En ce qui concerne les bosons (les constituants des rayonnements) il n'y a pas de relation d'indétermination étendue, car le nombre de constituants N dans un état quantique particulier n'a aucun effet et n'a aucune limite. La relation d'indétermination ne limite donc pas la densité de puissance de la lumière laser. En effet, la densité de puissance des faisceaux laser varie beaucoup plus que la densité de matière des solides.

La relation d'indétermination souligne une autre différence entre la matière et le Page 53 rayonnement. Comme nous l'avons vu ci-dessus, un système de N bosons identiques

* Cette règle implique que le spin 1 et les spins supérieurs peuvent également être obtenus *avec* des queues. Défi 117 e Pouvez-vous trouver une telle représentation?

Notez que les composites de fermions ne peuvent être des bosons que jusqu'à une certaine énergie, au-delà de laquelle la composition se rompt. Sinon, en assemblant des fermions en bosons, on pourrait avoir des fermions dans le même état.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

(tel qu'un faisceau laser) obéit à une indétermination entre son nombre de particules et sa phase. On peut facilement la dériver à partir de la relation d'indétermination entre l'énergie et le temps. La relation entre le nombre et la phase peut s'écrire approximativement

$$\Delta N \, \Delta\varphi \gtrsim 1 \, . \tag{68}$$

Cette relation est importante pour l'utilisation des lasers dans les expériences de précision. Elle limite à quel point un système peut être proche d'une onde sinusoïdale pure. En effet, pour une onde sinusoïdale pure le produit d'indétermination serait zéro.

Pour les fermions, pour lesquels le nombre maximum de particule dans le même état est égale à 1, la relation d'indétermination entre le nombre et la phase se réduit à une indétermination totale de la phase. Autrement dit, nous en concluons, une nouvelle fois, qu'il n'est pas possible d'avoir des faisceaux de fermions qui se comportent comme des ondes. Il n'y a pas d'ondes de fermions classiques dans la nature, pas de faisceaux de fermions cohérents.

Page 113

Un résumé sur le spin et l'indistinguabilité

Le quantum d'action $\hbar$ implique que les systèmes physiques sont constitués de deux types de particules quantiques indistinguables: les *bosons* et les *fermions*. Les deux comportements d'échange possibles sont liés à la valeur du spin de la particule, car l'échange est lié à la rotation. Le lien entre le spin et la rotation implique que les antiparticules existent. Il implique également que le spin est un phénomène intrinsèquement tridimensionnel.

Les expériences montrent que le rayonnement est constitué de particules élémentaires qui se comportent comme des bosons. Les bosons ont un spin entier. Plusieurs bosons (tels que deux photons) *peuvent partager* le même état. C'est ce partage qui rend possible la lumière laser.

Les expériences montrent que la matière est constituée de particules élémentaires qui se comportent comme des fermions. Les fermions ont un spin demi-entier. Ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli: deux fermions *ne peuvent pas* se trouver dans le même état. Le principe d'exclusion entre les électrons explique la structure des atomes et (en partie) leur taille. De même, il explique leur comportement chimique, comme nous le découvrirons plus loin. Le principe d'exclusion, lorsqu'on lui adjoint la répulsion électrostatique des électrons, explique l'incompressibilité de la matière et son impénétrabilité.

Les fermions sont responsables de la «dureté» de la matière, alors que les bosons permettent aux faisceaux lumineux de se croiser.

Les limites de la statistique quantique et quelques questions qui font toujours débat

Le sujet de la statistique des particules quantiques reste un domaine de recherche en physique théorique et en physique expérimentale. En particulier, des physiciens ont cherché (et continue de le faire) à généraliser les comportements possibles lors des échanges de particules.

En deux dimensions d'espace, l'effet d'un échange de particules sur la fonction d'onde est une phase continue. Ceci contraste avec le cas à trois dimensions, pour le-

Page 155

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

quel le résultat est un changement de signe. Les objets quantiques de dimension 2 sont donc appelés des *anyons* parce qu'ils peuvent avoir «n'importe quel» («any» en anglais [N.d.T.]) spin. Les anyons apparaissent comme des quasiparticules dans diverses expériences de la physique de l'état solide, parce que leur configuration effective est souvent bidimensionnelle. L'*effet Hall quantique fractionnel* (peut-être la découverte la plus intéressante de la physique expérimentale moderne) a propulsé les anyons sur la scène de la recherche moderne.

Vol. V, page 107

D'autres théoriciens ont généralisé le concept de fermion d'une façon différente, en introduisant les parafermions, les parabosons, les plektons et d'autres concepts hypothétiques. Oscar Greenberg a passé une grande partie de sa vie professionnelle sur le sujet. Sa conclusion est que

Ref. 93

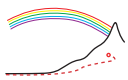
▷ Dans l'espace-temps de dimension 3 + 1, seuls les fermions et les bosons existent.

Pouvez-vous montrer que ce résultat implique que les fantômes qui apparaissent dans les contes écossais n'existent pas?

Défi 121 e

D'un autre point de vue, le modèle de la ceinture pour le spin 1/2 nous invite à étudier le comportement des tresses, des maillons ouverts et des nœuds. (En mathématiques, les tresses et les maillons ouverts sont faits de brins qui s'étendent à l'infini.) Cette partie fascinante de la physique mathématique est devenue importante parmi les théories unifiées modernes: elles établissent toutes que les particules (surtout aux énergies élevées) ne sont pas des entités ponctuelles, mais qu'elles sont étendues. La quête est de comprendre ce qu'il advient de la symétrie de permutation dans une théorie unifiée de la nature. Un aperçu des difficultés est déjà apparu plus haut: comment les Figures 60, 65 et 70 peuvent-elle être réconciliées et combinées? Nous réglerons ce problème dans la dernière partie de notre ascension de la montagne.

Vol. VI, page 174



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 7

Les superpositions et les probabilités – la théorie quantique sans idéologie

> "The fact that an adequate philosophical presentation has been so long delayed is no doubt caused by the fact that Niels Bohr brainwashed a whole generation of theorists into thinking that the job was done fifty years ago.**"
>
> Murray Gell-Mann

Ref. 94

Pourquoi ce problème de physique célèbre suscite-t-il des émotions si fortes? Et en particulier, qui subit un lavage de cerveau? Est-ce Gell-Mann, qui a découvert les quarks, ou bien la plupart des physiciens du monde qui travaillent sur la théorie quantique en suivant le point de vue de Niels Bohr? Au cours du XXe siècle, la mécanique quantique a semé le désarroi chez beaucoup d'entre eux. Notre but est simple: nous voulons *comprendre* la théorie quantique. La mécanique quantique n'est pas coutumière pour deux raisons: elle permet des *superpositions* et elle conduit à des *probabilités*. Dans ce chapitre nous explorons et clarifions ces deux sujets, jusqu'à ce que nous comprenions la théorie quantique.

Les probabilités apparaissent chaque fois qu'un aspect d'un système microscopique est mesuré. Le quantum d'action, la plus petite quantité de changement que l'on trouve dans la nature, conduit à l'apparition de probabilités au cours des mesures.

Les superpositions apparaissent parce que le quantum d'action change radicalement les deux concepts fondamentaux de la physique classique: l'état et le système. L'*état* n'est plus décrit et défini par les valeurs spécifiques que prennent la position et la quantité de mouvement, mais par la fonction d'onde spécifique que «prennent» les opérateurs de position et de quantité de mouvement.*** De plus, en physique classique un *système* est décrit et défini comme un ensemble d'aspect permanents de la nature, et la permanence a été définie comme étant une interaction négligeable avec l'environnement. La mécanique quantique nous montre que ces définitions doivent être modifiées.

Clarifier l'origine des superpositions et des probabilités, de même que les concepts de système et d'état, nous aidera à ne pas nous perdre en chemin vers le sommet de la

** «Le fait qu'une présentation philosophique adéquate ait été retardée pendant si longtemps est sans aucun doute dû au fait que Niels Bohr a pratiqué un lavage de cerveau sur toute une génération de théoriciens en leur faisant croire que le travail avait été fait il y a cinquante ans.»

*** Il est équivalent, et souvent conceptuellement plus clair, de dire que l'état est décrit par un ensemble complet d'opérateurs qui commutent. En fait, la discussion concernant les états est quelque peu simplifiée si on utilise la *représentation d'Heisenberg*. Cependant, dans ce livre nous étudions le problème uniquement avec la *représentation de Schrödinger*, c.-à-d. en utilisant les fonctions d'ondes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

montagne Mouvement. En effet, un nombre assez important de chercheurs se sont perdu depuis que la théorie quantique est apparue, y compris des physiciens importants tels que Murray Gell-Mann et Steven Weinberg.

Pourquoi les gens sont-ils soit morts soit vivants?

L'équation d'évolution de la mécanique quantique est *linéaire* par rapport à la fonction d'onde. Cette linéarité reflète l'existence de superpositions. Les superpositions impliquent qu'il est possible d'imaginer et d'essayer de construire des systèmes pour lesquels l'état ψ est une superposition de deux situations radicalement distinctes, telles que celles d'un chat mort et d'un chat vivant. Ce célèbre animale de fiction s'appelle le *chat de Schrödinger*, d'après l'auteur de l'exemple. Est-il possible de produire un chat dans un tel état? Et comment évoluerait-il dans le temps? On peut se poser ces deux mêmes questions dans d'autres situations. Par exemple, est-il possible de produire une superposition d'un état dans lequel une voiture serait à l'intérieur d'un garage fermé, avec un état dans lequel la voiture serait à l'extérieur? Que se passerait-il dans ce cas?

Les superpositions macroscopiques sont étranges. De telles situations ne s'observent pas dans la vie quotidienne, et même très rarement en laboratoire. La raison de cette rareté est un aspect important de ce que l'on appelle souvent «l'interprétation» de la mécanique quantique. En fait, de telles situations étranges *sont* possibles, et la superposition d'états macroscopiquement distincts a effectivement été observée dans quelques cas, bien que ce ne soit ni pour des chats, ni pour des personnes et ni pour des voitures. Pour nous faire une idée des contraintes, commençons par spécifier la situation plus en détails.*

Les superpositions macroscopiques, la cohérence et l'incohérence

La discussion porte sur les superpositions linéaires du type $\psi = a\psi_a + b\psi_b$, où ψ_a et ψ_b sont des états macroscopiquement distincts du système en cours de discussion, et où a et b sont des coefficients complexes. Des états sont dits *macroscopiquement distincts* lorsque chacun correspond à une situation macroscopique différente, c.-à-d. lorsqu'il est possible de distinguer les deux états en utilisant les concepts ou les méthodes de mesure de la physique classique. En particulier, cela signifie que l'action physique nécessaire pour passer d'un état à l'autre, doit être bien plus grande que $\hbar$. Par exemple, deux positions différentes d'un corps composé d'un grand nombre d'atomes sont macroscopiquement distinctes. L'état d'un chat vivant et celui du même chat lorsqu'il est mort diffèrent également par un grand nombre de quanta d'action.

Une situation «étrange» est donc la superposition d'états macroscopiquement distincts. Élaborons plus clairement l'essence de ces superpositions macroscopiques. Étant donnés deux états macroscopiquement distincts ψ_a et ψ_b, toute superposition du type $\psi = a\psi_a + b\psi_b$ est appelé un *état pur*. Puisque les états ψ_a et ψ_b peuvent interférer, on parle

* La plus grande partie de ce qui peut être dit sur ce sujet l'a été par trois chercheurs importants: Niels Bohr, un des pères de la physique quantique, John von Neumann qui, dans les années 1930, souligna la différence entre évolution et décohérence, et par Heinz-Dieter Zeh qui, dans les années 1970, souligna l'importance des thermostats et de l'environnement lors du processus de décohérence

Ref. 95
Ref. 96

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Toute « vue artistique » que l'on en fait est fausse.

(Pourquoi ?)

Défi 122 e

FIGURE 72 Une vue artistique d'une superposition macroscopique est impossible parce que l'on ne trouve pas de telles superpositions dans notre environnement.

encore de *superposition cohérente (en phase)*. Dans le cas d'une superposition d'états macroscopiquement distincts, il est évident que le produit scalaire $\psi_a^\dagger \psi_b$ s'annule. Dans le cas d'une superposition cohérente, le produit des coefficients $a^* b$ est différent de zéro. Ce fait peut également s'exprimer à l'aide de la *matrice densité* ρ du système, défini par $\rho = \psi \otimes \psi^\dagger$. Ici, $\otimes$ dénote le produit dyatique non commutatif (produit tensoriel) qui produit un tenseur (une matrice) à partir de deux vecteurs. Dans le cas présent, la matrice densité est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{pur}} = \psi \otimes \psi^\dagger &= |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger + a\, b^* \psi_a \otimes \psi_b^\dagger + a^*\, b\, \psi_b \otimes \psi_a^\dagger \\ &= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & a\, b^* \\ a^*\, b & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} . \end{aligned} \tag{69}$$

On peut alors dire que chaque fois que le système est dans un état pur (cohérent) sa matrice densité (sa *fonctionnelle densité*) contient alors des termes en dehors de la diagonale du même ordre de grandeur que ceux de la diagonale.* Une telle matrice densité correspond à la situation étrange que nous avons mentionnée plus haut et que l'on n'observe jamais dans la vie quotidienne. Nous comprendrons bientôt pourquoi.

Voyons maintenant la situation inverse d'une matrice densité pour des états macroscopiques distincts ayant des termes non-diagonaux qui s'*annulent*. Pour deux états, l'exemple

$$\begin{aligned} \rho_{\text{mixte}} &= |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger \\ &= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} , \end{aligned} \tag{71}$$

décrit un système qui ne possède *pas* de cohérence de phase du tout. Une telle matrice densité diagonale ne peut pas être celle d'un état pur. Elle décrit un système qui a une probabilité $|a|^2$ de se trouver dans l'état ψ_a et une probabilité $|b|^2$ de se trouver dans l'état ψ_b. On dit qu'un tel système est dans un état mixte, parce que son état *n'est pas connu*,

* En utilisant la matrice densité, on peut réécrire l'équation d'évolution d'un système quantique:

$$\dot{\psi} = -iH\psi \quad \text{devient} \quad \frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] . \tag{70}$$

Les deux sont complètement équivalentes. (La nouvelle expression est parfois également appelée l'*équation de von Neumann*.) Nous ne ferons aucun calcul ici. Les expressions sont fournies pour que vous puissiez les reconnaître si vous les rencontrez ailleurs.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

ou, de façon équivalente, qu'il est dans une *superposition incohérente (en phase)*: il n'est pas possible d'observer des interférences dans une telle situation. Un système décrit par un état mixte se trouve toujours *soit* dans l'état ψ_a, *soit* dans l'état ψ_b. Autrement dit, une matrice densité diagonale pour des états macroscopiquement distincts n'est pas en contradiction, mais en accord avec l'expérience quotidienne.

Dans la représentation utilisant les matrices densité, ce sont les éléments non diagonaux qui renferment la différence entre les superpositions normales, c.-à-d. incohérentes, et les superpositions inhabituelles ou étranges, c.-à-d. cohérentes.

La situation expérimentale est claire: pour des états macroscopiquement distincts, seules des matrices densité diagonales sont observées dans la vie quotidienne. Presque tous les systèmes en superposition macroscopique cohérente perdent d'une façon ou d'une autre leurs éléments de matrice non diagonaux. Comment ce processus de *décohérence* (que l'on appelle également *désintrication* dans certains contextes) se produit-il? C'est la matrice densité elle-même qui nous le montre.

La décohérence est due aux thermostats

En thermodynamique, la matrice densité ρ d'un gros système est utilisée pour la définition de son entropie S (ainsi que de toutes ses autres grandeurs thermodynamiques). Ces études montrent que

Ref. 97
Défi 123 pe

$$S = -k \operatorname{tr}(\rho \ln \rho) \,, \tag{72}$$

où tr dénote la *trace* d'une matrice, c.-à-d. la somme de tous les éléments de sa diagonale, et k est la constante de Boltzmann. Cette expression est donc la définition de l'entropie en mécanique quantique.

Mais rappelons-nous maintenant qu'un système physique ayant une grande entropie qui reste constante s'appelle un *thermostat*. En termes physiques simples, un thermostat et un système auquel il est possible d'attribuer une température. Plus précisément,

> Un *thermostat (physique)*, que l'on appelle aussi un *réservoir (thermodynamique)*, est n'importe quel gros système pour lequel il est possible d'appliquer le concept d'*équilibre*.

Les expériences montrent que dans la pratique, ceci est équivalent à la condition qu'un thermostat doit être constitué de nombreux sous-systèmes qui interagissent entre eux. Pour cette raison, toutes les grandeurs macroscopiques décrivant l'état d'un thermostat présentent des petites *fluctuations* irrégulières, une propriété qui sera d'une importance fondamentale sous peu.

Un bain de la vie quotidienne est aussi un thermostat physique: en effet, un thermostat thermodynamique est similaire à un bain d'eau tiède extrêmement grand, pour lequel la température ne change pas même si on y ajoute de l'eau froide ou de l'eau chaude. Le concept physique de thermostat (ou de réservoir) est donc une abstraction et une généralisation du concept de bain de la vie quotidienne.* Quelques autres exemples de

* Cette abstraction est tellement claire dans l'esprit des physiciens que la littérature anglaise utilise le mot «bath» (bain) pour désigner un thermostat physique [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

thermostats physiques sont: un champ magnétique intense, une grande quantité de gaz ou un solide volumineux. (Les sens des mots «intense», «grande» et «volumineux» dépendent bien évidement du système étudié.)

La définition (72) de l'entropie nous renseigne que la perte des éléments non diagonaux correspond à une augmentation de l'entropie. En outre, toute augmentation de l'entropie d'un système réversible, tel que le système mécanique quantique en question, est due à l'interaction avec un thermostat.

Défi 124 e

En bref, *la décohérence est due à l'interaction avec un thermostat*. De plus, la décohérence est un processus qui augmente l'entropie: la décohérence est irréversible. Nous allons maintenant montrer que l'on trouve des thermostats partout, qu'il en découle que la décohérence se produit partout et tout le temps, et que l'on n'observe donc (presque) jamais de superpositions macroscopiques.

Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la diffusion

Où se trouve le thermostat interagissant avec un système typique? Le thermostat doit se trouver à l'extérieur du système dont on parle, c.-à-d. dans son *environnement*. En effet, nous savons par expérience qu'un environnement typique est grand et qu'il est caractérisé par une température. Quelques exemples sont énumérés dans le Tableau 6. En bref,

▷ N'importe quel environnement est un thermostat.

Nous pouvons aller encore plus loin: pour chaque situation expérimentale, il y a un thermostat qui *interagit* avec le système étudié. En effet, tout système que l'on peut observer n'est pas isolé, puisqu'il interagit évidemment au moins avec l'observateur, et que, par définition, tout observateur comporte un thermostat, comme nous le montrerons plus en détails bientôt. Cependant, les thermostats les plus importants que nous devons habituellement prendre en considération sont: l'atmosphère qui entoure le système; les rayonnements ou les champs électromagnétiques qui interagissent avec le système; ou, si le système lui-même est suffisamment grand pour avoir une température, les degrés de liberté du système qui ne sont pas impliqués dans la superposition qui fait l'objet de l'étude.

Puisque tout système physique est en contact avec un thermostat, toute matrice densité d'une superposition macroscopique finira éventuellement par perdre ses éléments non diagonaux. À première vue, ce raisonnement n'est pas convainquant. Les interactions d'un système avec son environnement peuvent être fortement réduites en utilisant des configurations expérimentales astucieuses, ce qui impliquerait qu'il soit possible de produire un temps de décohérence extrêmement long. Il nous faut donc vérifier combien de temps il faut à une superposition d'états pour perdre sa cohérence. Il se trouve qu'il existe deux méthodes standard pour estimer le *temps de décohérence*: soit en modélisant le thermostat par un grand nombre de particules en collisions, soit en le modélisant par un champ continu.

Si le thermostat est décrit comme un ensemble de particules percutant aléatoirement le système microscopique, la meilleure façon de caractériser le thermostat est en utilisant

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 6 Thermostats courants (et moins courants) avec leurs propriétés principales.

TYPE DE THERMOSTAT	TEMPÉRATURE	LONGUEUR D'ONDE	FLUX DE PARTICULES	SECTION EFFICACE (ATOME)	INTERVALLE ENTRE DEUX COLLISIONS $1/\sigma\varphi$ POUR	
					ATOME[a]	BALLE[a]
	T	λ_{eff}	φ	σ		
thermostats de matière						
solide, liquide	300 K	10 pm	$10^{31}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-19}\,\text{m}^2$	10^{-12} s	10^{-25} s
air	300 K	10 pm	$10^{28}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-19}\,\text{m}^2$	10^{-9} s	10^{-22} s
vide de laboratoire	50 mK	10 µm	$10^{18}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-19}\,\text{m}^2$	10 s	10^{-12} s
thermostats de photons						
lumière du Soleil	5800 K	900 nm	$10^{23}\,/\text{m}^2\text{s}$		10^{-4} s	10^{-17} s
«ténèbres»	300 K	20 µm	$10^{21}\,/\text{m}^2\text{s}$		10^{-2} s	10^{-15} s
micro-ondes cosmiques	2, 7 K	2 mm	$10^{17}\,/\text{m}^2\text{s}$		10^{2} s	10^{-11} s
ondes radio terrestres						
effet Casimir					très grand	
effet Unruh de la Terre	40 zK				très grand	
thermostats de rayonnement nucléaire						
radioactivité		10 fm	$1\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-25}\,\text{m}^2$	10^{25} s	10^{12} s
rayonnement cosmique	>1000 K	10 fm	$10^{-2}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-25}\,\text{m}^2$	10^{27} s	10^{14} s
neutrinos solaires	≈ 10 MK	10 fm	$10^{11}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-47}\,\text{m}^2$	10^{36} s	10^{15} s
neutrinos cosmiques	2, 0 K	3 mm	$10^{17}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-62}\,\text{m}^2$	10^{45} s	10^{24} s
thermostats gravitationnels						
rayonnement gravitationnel	$5 \cdot 10^{31}$ K	10^{-35} m			très grand	

a. Les valeurs sont des estimations grossières. On suppose que la balle macroscopique a une taille de 1 mm.

la longueur d'onde effective λ_{eff} des particules et l'intervalle de temps moyen t_{col} entre deux collisions. Un calcul simple montre que le temps de décohérence t_d est, dans tous les cas, plus petit que cet intervalle de temps, de sorte que

Défi 125 pe

$$t_d \leqslant t_{\text{col}} = \frac{1}{\varphi\sigma}\,, \tag{73}$$

où φ est le flux de particules et σ est la section efficace de collision.* Des valeurs typiques

* Le temps de décohérence est obtenu en étudiant l'évolution de la matrice densité $\rho(x, x')$ d'un objet localisé en deux points x et x'. On trouve que les éléments non diagonaux satisfont $\rho(x, x', t) = \rho(x, x', 0)\text{e}^{-\Lambda t(x-x')^2}$, où le taux de localisation Λ est donné par

$$\Lambda = k^2\varphi\sigma_{\text{eff}} \tag{74}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont données dans le Tableau 6. On remarquera facilement que pour des objets macroscopiques, les temps de décohérence sont extrêmement courts. (On notera également que les effets nucléaire et gravitationnel conduisent à des temps de décohérence longs et qu'ils peuvent donc être négligés.) *La diffusion conduit à des décohérences rapides des systèmes macroscopiques*. Cependant, pour les atomes ou les petits systèmes, la situation est différente, comme on peut s'y attendre. *Les systèmes microscopiques peuvent exhiber des temps de décohérence longs*.

On remarquera que le quantum d'action $\hbar$ apparaît dans l'expression donnant le temps de décohérence, puisqu'il apparaît dans la surface σ. La décohérence est un processus quantique.

Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la relaxation

Une deuxième méthode pour estimer le temps de décohérence est également couramment utilisée. Toute interaction d'un système avec un thermostat est décrite par un temps de relaxation t_r. Le terme «*relaxation*» désigne n'importe quel processus qui conduit à un retour à l'état d'équilibre. Les termes «*amortissement*» et «*frottement*» sont également utilisés. Dans le cas présent, le temps de relaxation décrit le retour à l'équilibre de la combinaison thermostat-système. La relaxation est un exemple d'évolution irréversible. Un processus est dit *irréversible* si le processus inverse, au cours duquel tous les composants se déplaceraient dans la direction opposée, a une probabilité très faible de se produire.* Par exemple, nous sommes habitués à ce qu'un verre de vin déversé dans un bol d'eau colore l'intégralité de l'eau. Il est très rarement observé que le vin et l'eau se séparent à nouveau, car la probabilité pour que toutes les molécules de vin et d'eau inversent leur direction en même temps est plutôt faible, un état de fait qui fait le bonheur des producteurs de vin et le désespoir des consommateurs.

Tentons maintenant de simplifier la description du thermostat. Nous l'approximons par un unique champ scalaire, non spécifié, qui interagit avec le système quantique. À cause de la continuité de l'espace, un tel champ a une infinité de degrés de liberté. On les utilise pour modéliser les nombreux degrés de liberté du thermostat. Le champ est supposé se trouver dans un état initial pour lequel ses degrés de liberté sont excités d'une manière décrite par une température T. L'interaction du système avec le thermostat, qui est à l'origine du processus de relaxation, peut être décrite par le transfert répété de petites quantités d'énergie E_{col} jusqu'à la fin du processus de relaxation.

Les objets qui nous intéressent dans cette discussion, tels que le chat, la personne ou la voiture que nous avons mentionnés plus haut, sont décrits par leur masse m. Leur caractéristique principale est l'énergie maximale E_r qui peut être transférée du

où k est le nombre d'onde, φ est le flux et σ_{eff} est la section efficace de collision, c.-à-d. habituellement la taille de l'objet macroscopique.

Ref. 98

On arrive également à un autre résultat surprenant: un système percuté par une particule d'énergie E_{col} voit la matrice densité s'*effondrer* approximativement jusqu'à la longueur d'onde (thermique) de de Broglie de la particule incidente. Ces deux résultats, ensembles, conduisent à la formule ci-dessus.

Ref. 99

* Méfiez-vous des autres définitions qui tentent de présenter le concept d'irréversibilité comme quelque chose de plus profond, telles que les affirmations que le terme «irréversible» signifie que le processus inverse n'est *pas possible du tout*. De nombreuses prétendues «contradictions» entre l'irréversibilité des processus et la réversibilité des équations d'évolution sont dues à cette interprétation erronée du terme «irréversible».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

système vers l'environnement. Cette énergie décrit les interactions entre le système et l'environnement. Les superpositions d'états macroscopiques qui nous intéressent ici sont des solutions de l'évolution de l'hamiltonien de ces systèmes.

La cohérence initiale de la superposition, qui contraste de façon si troublante avec notre expérience quotidienne, disparaît exponentiellement avec un *temps de décohérence* Ref. 100 t_d donné par*

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{col}}}{E_r} \frac{e^{E_{\text{col}}/kT} - 1}{e^{E_{\text{col}}/kT} + 1} \tag{77}$$

ou k est encore une fois la *constante de Boltzmann*, et comme ci-dessus, E_r est l'énergie maximale qui peut être transférée du système vers l'environnement. Notez que l'on a toujours $t_d \leqslant t_r$. Une fois que le temps de décohérence t_d s'est écoulé, le système a évolué de la superposition cohérente des états vers leur superposition incohérente. Autrement dit, la matrice densité a perdu ses termes non diagonaux. On dit également que la cohérence de phase de ce système a été détruite. Donc, après un temps t_d, on trouvera le système soit dans l'état ψ_a, soit dans l'état ψ_b avec les probabilités respectives $|a|^2$ et $|b|^2$, mais plus dans une superposition cohérente qui contredit tellement notre expérience quotidienne. Lequel des deux états finaux est sélectionné dépend de l'état précis du thermostat, dont les détails ont été éliminés du calcul en prenant une *moyenne* sur les états de tous ses constituants microscopiques.

Le résultat important est que pour tout objet *macroscopique*, le temps de décohérence t_d est extrêmement petit. Pour voir ceci plus clairement, nous pouvons étudier un cas spécial simple. Supposons qu'un objet macroscopique de masse m, tel que le chat ou la voiture mentionnés ci-dessus, se trouve au même instant en deux endroits différents séparés par une distance l, c.-à-d. dans une superposition des deux états correspondants. Nous supposerons également que la superposition est due au fait que l'objet se déplace suivant le mouvement d'un oscillateur mécanique quantique de pulsation ω entre les deux positions. Ceci est le système le plus simple permettant de montrer les superpositions d'un objet se trouvant en deux endroits différents. L'énergie de l'objet est alors donnée par $E_r = m\omega^2 l^2$, et la plus petite énergie de transfert $E_{\text{col}} = \hbar\omega$ est la différence entre les niveaux d'énergie de l'oscillateur. Pour une situation macroscopique, cette dernière énergie est beaucoup plus petite que kT, de sorte que l'expression précédente nous

* Ce résultat est dérivé comme dans le cas ci-dessus. Un système interagissant avec un thermostat a toujours Ref. 101 une évolution donnée par la forme générale

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] - \frac{1}{2t_o}\sum_j [V_j\rho, V_j^\dagger] + [V_j, \rho V_j^\dagger] \,, \tag{75}$$

où ρ est la matrice densité, H est l'hamiltonien, V est le potentiel de l'interaction et t_o est le temps ca- Défi 126 pe ractéristique de l'interaction. Pouvez-vous voir pourquoi? Lorsque l'on résout cette équation, on trouve $\rho(t) = \rho_0 e^{-t/t_0}$ pour les éléments loin de la diagonale. Autrement dit, ils disparaissent avec un temps caractéristique t_o. Dans la plupart des situations, on a une relation de la forme

$$t_0 = t_r \frac{E_{\text{col}}}{E_r} = t_{\text{col}} \tag{76}$$

ou une variante de celle-ci, comme dans l'exemple ci-dessus.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 102 donne

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{col}}^2}{2E_r\, kT} = t_r \frac{\hbar^2}{2mkTl^2} = t_r \frac{\lambda_T^2}{l^2} \tag{78}$$

dans laquelle la pulsation ω a disparue. La quantité $\lambda_T = \hbar/\sqrt{2mkT}$ s'appelle la *longueur d'onde thermique de de Broglie* d'une particule.

Nous noterons une fois de plus que le quantum d'action $\hbar$ apparaît dans l'expression du temps de décohérence. La décohérence est un processus quantique.

Il est assez simple de voir que pour pratiquement tous les objets macroscopiques, le temps de décohérence typique t_d est extrêmement court. Par exemple, en prenant $m = 1\,\text{g}$, $l = 1\,\text{mm}$ et $T = 300\,\text{K}$, on obtient $t_d/t_r = 1,3 \cdot 10^{-39}$. Même si l'interaction entre le système et l'environnement était tellement faible, au point que le temps de relaxation du système soit égal à l'âge de l'Univers, qui est d'environ $4 \cdot 10^{17}\,\text{s}$, le temps de décohérence t_d serait encore inférieur à $5 \cdot 10^{-22}\,\text{s}$, ce qui est plus d'un million de fois plus rapide que la période d'oscillation d'un faisceau lumineux (environ 2 fs pour de la lumière verte). Dans le cas du chat de Schrödinger, le temps de décohérence serait encore plus petit. Ces temps sont si courts qu'il n'est même pas possible d'espérer *préparer* la superposition cohérente initiale, et encore moins d'observer sa décroissance ou de mesurer sa durée de vie.

Cependant, dans le cas des systèmes microscopiques, la situation est différente. Par exemple, pour un électron dans un solide refroidit à la température de l'hélium liquide, nous avons $m = 9,1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}$, et typiquement $l = 1\,\text{nm}$ et $T = 4\,\text{K}$. On obtient alors $t_d \approx t_r$ et le système peut ainsi rester dans une superposition cohérente jusqu'à ce qu'il soit relaxé, ce qui confirme que dans ce cas, il est effectivement possible d'observer les effets de la cohérence si le système est maintenu isolé. Un exemple typique est le com-
Ref. 103 portement des électrons dans un matériau supraconducteur. Nous en mentionnerons quelques autres plus loin.

En 1996, la première mesure réelle de temps de décohérence a été publiée par l'équipe
Ref. 104 parisienne conduite par Serge Haroche. Elle confirmait la relation entre le temps de décohérence et le temps de relaxation, montrant ainsi que les deux processus devaient être distingués à l'échelle microscopique. Depuis, de nombreuses autres expériences ont
Ref. 105 confirmé le processus de décohérence et son équation d'évolution, aussi bien pour des petites valeurs que pour des grandes valeurs de t_d/t_r. Une expérience particulièrement
Ref. 106 élégante, a été réalisée en 2004. Au cours de cette dernière, il a été possible d'observer la disparition des interférences produites par le passage de molécules de fullerène C_{70} au travers de deux fentes, lorsqu'un thermostat interagissait avec elles.

Un résumé sur la décohérence, la vie et la mort

Notre exploration nous a montré que *la décohérence résultait du couplage avec un thermostat de l'environnement*. La décohérence est un effet statistique quantique, c.-à-d. un effet thermodynamique. La décohérence découle de la théorie quantique et c'est un processus irréversible qui se produit donc automatiquement. Par-dessus tout, la décohérence est un processus qui a été observé lors d'expériences.

Les estimations des temps de décohérence de la vie quotidienne nous renseignent que la préparation et le maintien d'une superposition d'états macroscopiquement différents

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont tous deux *impossibles*, à cause de l'interaction avec n'importe lequel des thermostats que l'on trouve dans l'environnement. Ceci est le cas, même si la mesure habituelle de cette interaction, produite par les frottements au cours du mouvement du système, est très petite. Même lorsqu'un système macroscopique est soumis à des frottements extrêmement faibles, conduisant à un temps de relaxation très long, son temps de décohérence est toujours extrêmement court. Seuls des systèmes microscopiques soigneusement conçus en utilisant des dispositifs de laboratoire couteux, peuvent atteindre des temps de décohérence substantiels.

Notre environnement quotidien est rempli de thermostats. Donc,

▷ Les superpositions cohérentes d'états macroscopiquement distincts n'apparaissent jamais dans la vie quotidienne, en raison des temps de décohérence très courts induits par les thermostats de l'environnement.

Les voitures ne peuvent pas être en même temps à l'intérieur et à l'extérieur d'un garage. Nous ne pouvons pas être à la fois mort et à la fois vivant. Une illustration d'une superposition macroscopique (voir la Figure 122) est impossible. En accord avec l'explication, des
Page 176
superpositions cohérentes d'états macroscopiques apparaissent dans certaines situations spéciales en laboratoire.

Qu'est-ce qu'un système? Qu'est-ce qu'un objet?

En physique classique, un système est une partie de la nature qui peut être isolée de son environnement. Cependant, la mécanique quantique nous renseigne que les systèmes isolés n'existent pas, car il n'est pas possible de réduire les interactions au point qu'elles deviennent nulles. La contradiction peut se résoudre avec les résultats que l'on vient de voir ci-dessus: ils nous permettent de définir plus précisément le concept de système.

▷ Un *système* est n'importe quelle partie de la nature qui interagit de façon *incohérente* avec son environnement.

Ceci implique que

▷ Un *objet* est une partie de la nature qui interagit avec son environnement seulement par l'intermédiaire de thermostats.

En particulier, nous obtenons que

▷ Un système est dit *microscopique* (ou *quantique*), et il peut se décrire à l'aide d'une fonction d'onde ψ, chaque fois que:
  — il est presque isolé, avec $t_{\text{évol}} = \hbar/\Delta E < t_{\text{r}}$, et
Ref. 107
  — il est en interaction *incohérente* avec son environnement.

En bref, un système microscopique (ou quantique) ne peut être décrit par une fonction d'onde que s'il interagit de façon incohérente et faiblement avec son environnement. (Pour un tel système, l'indétermination ΔE sur l'énergie est plus grande que l'énergie

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de relaxation.) Au contraire, un thermostat n'est jamais isolé au sens que l'on vient de donner, parce que le temps d'évolution d'un thermostat (l'échelle de temps au cours de laquelle ses propriétés changent) est toujours beaucoup plus grand que son temps de relaxation. Puisque tous les corps macroscopiques sont en contact avec des thermostats (ou peuvent même en contenir un), ils ne peuvent pas être décrits par une fonction d'onde. En particulier, il est impossible de décrire un instrument de mesure quelconque à l'aide d'une fonction d'onde.

Nous concluons donc que

▷ Un *système macroscopique* est un système ayant un temps de décohérence beaucoup plus court que n'importe quel autre temps d'évolution de ses constituants.

De toute évidence, les systèmes macroscopiques interagissent également de façon incohérente avec leur environnement. Donc, les chats, les voitures et les présentateurs de journaux télévisés sont tous des systèmes macroscopiques.

L'intrication

Une possibilité est ignorée par les deux définitions d'un système: que se passe-t-il dans la situation pour laquelle les interactions avec l'environnement sont *cohérentes*? Nous rencontrerons quelques exemples bientôt. Si on s'en tient aux définitions, ces systèmes ne sont ni microscopiques, ni macroscopiques:

▷ Un «système» pour lequel l'interaction avec l'environnement est cohérente est dit *intriqué*.

De tels «systèmes» ne sont pas décrits par une fonction d'onde, et pour être strict, ce ne sont *pas* des systèmes. Dans ces situations, pour lesquelles l'interaction est cohérente, on parle d'*intrication* (ou d'*enchevêtrement* [N.d.T.]). Par exemple, on dit qu'une particule, ou qu'un ensemble de particules, est *intriquée* avec son environnement.

Des systèmes intriqués, c.-à-d. qui interagissent de façon cohérente, peuvent être séparés, mais il faut les désintriquer lorsqu'on le fait. L'acte de séparation conduit à des entités détachées, et des entités détachées interagissent de façon incohérente. La théorie quantique nous montre que la nature n'est pas faite d'entités détachées, mais qu'elle est faite d'entités *détachables*. En théorie quantique, le critère de détachement est l'incohérence de l'interaction. Les superpositions cohérentes impliquent une conséquence surprenante: il existe des systèmes qui, bien qu'ils aient l'air d'être constitués de parties détachées, ne le sont pas. L'intrication pose une limite au détachement. Toutes les propriétés surprenantes de la mécanique quantique, tel que celle du chat de Schrödinger, sont des conséquences du préjudice causé par la physique classique quand elle nous enseigne qu'un système composé de deux ou plusieurs parties peut, de toute évidence, être détaché en deux sous-systèmes sans causer de perturbation. Mais les superposition cohérentes (les systèmes intriqués), ne permettent pas les détachements sans perturbation. Chaque fois que l'on suppose être capable de détacher des systèmes intriqués, on obtient des conclusions étranges ou incorrectes, tel qu'une propagation en apparence plus ra-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pide que la lumière, ou, comme on dit aujourd'hui, un comportement non local. Jetons un coup d'œil à quelques exemples typiques.

Des situations intriquées se rencontrent dans de nombreuses expériences. Par exemple, lorsqu'un électron et un positon s'annihilent pour produire deux photons, les polarisations de ces deux photons sont intriquées, comme on le mesurait déjà en 1949. De même, lorsqu'un atome excité se désintègre par étapes, en émettant deux photons, les polarisations des photons sont intriquées, comme il l'a été démontré pour la première fois en 1966 avec des atomes de calcium. D'une façon similaire, lorsqu'une molécule instable dans un état singulet, c.-à-d. dans un état de spin 0, se désintègre ou se divise en résidus, les spins des résidus sont intriqués, comme il a été observé dans les années 1970. De même, la conversion paramétrique descendante spontanée des photons produit une intrication. Dans un matériau optique non linéaire, un photon entrant est converti en deux photons sortants et dont la somme des énergies correspond à l'énergie du photon initial. Dans ce cas, les deux photons produits sont deux fois intriqués: pour leur polarisation et pour leur direction. En 2001, les spins de deux échantillons de gaz de césium extrêmement froids, chacun ayant des millions d'atomes et se trouvant séparés l'un de l'autre de quelques millimètres, ont été intriqués. De même, l'intrication concernant la position a été observée régulièrement, par exemple pour des ions rapprochés dans des pièges à ions.

La théorie quantique est-elle non locale? Un aperçu sur le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen

> [Mr. Duffy] lived a little distance away from his body ...
>
> James Joyce, *A Painful Case**

Il est souvent incorrectement suggéré que l'effondrement de la fonction d'onde, ou encore la théorie quantique, n'est pas local.** Cette question a besoin d'être clarifié.

Nous commençons par imaginer un électron qui percute un écran après être passé à travers une fente. En suivant la description que nous venons juste de déduire, le processus d'effondrement se déroule schématiquement comme décrit sur la Figure 73. Une animation comportant un autre exemple du processus d'effondrement (inspiré par l'expérience de pensée de Bohm) peut être visualisée sur le coin inférieur gauche de ces pages, en commençant à la page 129. Le processus d'effondrement a un côté surprenant: à cause de la brièveté du temps de décohérence, durant l'effondrement de cette fonction d'onde (ainsi que de n'importe quelle autre) le maximum de la fonction d'onde change généralement de position plus rapidement que la lumière. Ceci est-il raisonnable?

Page 175

Une situation est dite *acausale* ou *non locale* si l'énergie est transportée plus vite que la lumière. En utilisant la Figure 73, et en vous aidant de résultats de propagation du signal, vous pouvez déterminer la vitesse de l'énergie impliquée. La valeur trouvée est plus petite que *c*. Une fonction d'onde dont le maximum se déplace plus vite que la lumière n'implique *pas automatiquement* que l'énergie se déplace plus vite que la lumière.

Défi 127 e

Vol. III, page 133

* «[Monsieur Duffy] vivait à une petite distance de son corps ...» James Joyce, Un cas douloureux.

** Ceci est la continuation d'un sujet que nous connaissons déjà: nous avons exploré un peu plus tôt, en relativité générale, un autre type de non-localité.

Vol. II, page 284

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

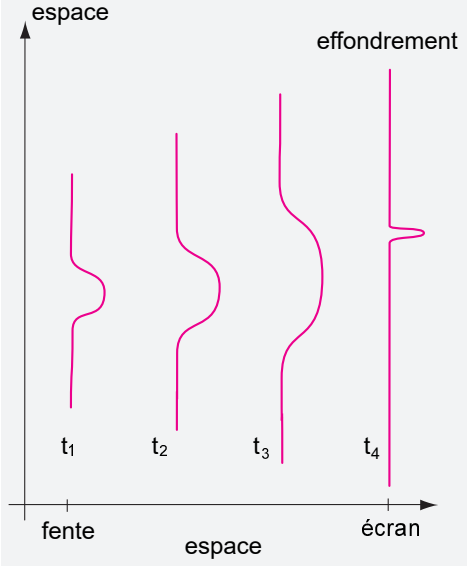


FIGURE 73 Le mouvement en mécanique quantique: la fonction d'onde d'un électron (ou plutôt le carré de son module) entre l'instant où il passe à travers une fente et celui où il percute l'écran.

Autrement dit, la théorie quantique contient des vitesses plus grandes que celles de la lumière, mais pas des vitesses d'*énergie* plus grandes que celles de la lumière. En électrodynamique classique, la même chose se produit avec les potentiels scalaires et les potentiels vecteurs si on utilise la jauge de Coulomb. Nous avons également rencontré des vitesses plus grandes que celles de la lumière dans le cas du déplacement des ombres et dans le cas des ciseaux, ainsi que lors de nombreuses autres observations. Tout physicien a donc maintenant deux options: il peut dire franchement qu'il n'y a pas de non-localité dans la nature, ou bien il peut être moins franc et prétendre que la non-localité existe. Dans le deuxième cas, il devrait également prétendre que même la physique classique est non locale. Cependant personne n'ose le faire. En fait, il y un danger à utiliser cette version plus dérangeante du terme «non local»: un faible pourcentage parmi ceux qui prétendent que le monde est non local finissent par croire, après un certain temps, qu'il existe vraiment un transport d'énergie plus rapide que la lumière dans la nature. Ces gens deviennent prisonniers de leur pensée confuse. D'un autre côté, le manque de rigueur aide à faire plus facilement la une des journaux. En bref, même si la définition de la non-localité n'est pas unanime, dans ce texte, nous nous en tenons à celle qui est la plus stricte et nous définissons la non-localité comme un transport d'*énergie* plus rapide que la lumière.

Ref. 108

Vol. II, page 58

Une expérience de pensée souvent citée pour montrer les pièges de la non-localité a été proposée par Bohm* lors de la discussion concernant le paradoxe dit de Einstein-Podolsky-Rosen. Dans leur article célèbre décrivant le paradoxe EPR, les trois auteurs essayaient de trouver une contradiction entre la mécanique quantique et le bon sens. Bhom a converti leur article, quelque peu confus, en une expérience de pensée claire que l'on montre de façon schématique sur la Figure 74. Lorsque deux particules dans un état

Ref. 109, Ref. 110

* David Joseph Bohm (1917 – 1992), était un physicien influent. Il codécouvrit l'effet Aharonov-Bohm et passa une grande partie du reste de sa vie à étudier les rapports entre la physique quantique et la philosophie.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

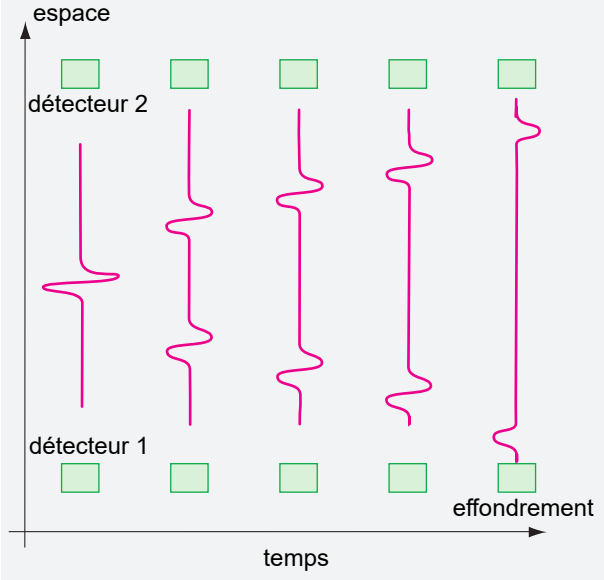


FIGURE 74 L'expérience de pensée de Bohm.

de spin 0 s'éloignent l'une de l'autre, la mesure de l'orientation du spin d'une des deux particules implique également un effondrement *immédiat* du spin de l'autre particule, à savoir, l'orientation de son spin est exactement dans la direction opposée. Ceci se produit instantanément, malgré la distance de séparation. Aucune limitation de vitesse n'est donc respectée. Autrement dit, l'intrication semble conduire à une communication plus rapide que la lumière.

Cependant, au cours de l'expérience de Bohm, aucune énergie n'est transportée plus rapidement que la lumière. Aucune non-localité n'est présente, malgré les nombreuses affirmations du contraire de la part de certains auteurs. Les deux électrons intriqués appartiennent à un même système, et supposer qu'ils sont séparés uniquement parce que la fonction d'onde a deux maximums distants est une erreur conceptuelle. En fait, aucun signal ne peut être transmis à l'aide de cette méthode. La décohérence est un cas de prédiction qui ressemble à un signal sans en être un. L'expérience de Bohm, comme toute autre expérience du type EPR, ne permet pas de communication plus rapide que la lumière. Nous avons déjà discuté de tels cas dans la section sur l'électrodynamique.

Vol. III, page 136

L'expérience de Bohm a finalement été réalisée. La première, et la plus célèbre, de ces réalisations a été due, en 1982, à Alain Aspect et elle utilisait des photons au lieu d'électrons. Comme tous les tests réalisés par la suite, elle a confirmé pleinement la mécanique quantique.

Ref. 111

En fait, les expériences telles que celle d'Alain Aspect confirment qu'il est impossible de traiter l'une ou l'autre des deux particules comme un système en soi. Il est impossible d'attribuer une quelconque propriété physique, telle qu'une orientation de spin, à l'une ou l'autre des deux particules. (La représentation d'Heisenberg exprimerait cette restriction encore plus clairement.) Seul l'ensemble formé par les deux électrons constitue un système physique, car seule la paire interagit de façon incohérente avec l'environnement.

Les deux exemples de non-localité apparente que nous venons de avons mention-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nés peuvent être rejetés avec la remarque suivante: puisqu'il est évident qu'aucun flux d'énergie plus rapide que la lumière n'est impliqué, aucun problème de causalité n'apparaît. L'exemple suivant est donc plus intéressant. Prenez deux atomes identiques, un dans un état excité et l'autre dans son état fondamental, et appelez l la distance qui les sépare. L'intuition nous dit que si le premier atome retourne dans son état fondamental en émettant un photon, le deuxième atome ne pourra être excité par le photon que si un temps $t = l/c$ s'est écoulé, c.-à-d. après que le photon a voyagé vers le deuxième atome.

Cela pourra sans doute paraître étonnant, mais cette conclusion est fausse. Le deuxième atome dans son état fondamental a une probabilité non nulle de s'exciter au moment même où le premier se désexcite. Ceci a été montré, de la manière la plus simple
Ref. 112 qu'il puisse être, par Gerhard Hegerfeldt. Le résultat a également été confirmé expérimentalement.

Des études plus minutieuses montrent que le résultat dépend du type de superposition (cohérente ou incohérente) dans laquelle se trouvent les deux atomes au départ. Pour des superpositions incohérentes, le résultat intuitif est correct. Le résultat contre-intuitif n'apparaît que dans le cas de superposition cohérentes. Encore une fois, une discussion minutieuse montre qu'aucune non-localité réelle de l'énergie n'est impliquée.

En résumé, des vitesses plus rapides que celle de la lumière au cours de l'effondrement des fonctions d'onde ne contredisent aucunement la limite de la relativité restreinte sur la vitesse de transport de l'énergie. Les vitesses d'effondrement sont des vitesses de phase. Dans la nature, les vitesses de phase son illimitées. Les vitesses de phases illimitées n'impliquent jamais un transport d'énergie plus rapide que la lumière. De plus, on retrouve le résultat que les systèmes physiques ne sont clairement définis que s'ils interagissent de manière incohérente avec leur environnement.

Curiosités et défis amusants concernant les superpositions

Certains affirment à tort qu'il est possible de photographier des atomes dans une superposition de deux états centrés à des positions différentes. (Ce mensonge est même utilisé
Défi 128 e par des sectes, dans l'intention d'attirer des adeptes). Pourquoi ceci n'est-il pas vrai?

* *

Dans quelques cas, il est effectivement possible d'observer la superposition d'états macroscopiques différents en abaissant la température à des valeurs suffisamment petites et en choisissant minutieusement des masses ou des distance convenablement petites. Deux exemples bien connus de superpositions cohérentes sont ceux que l'on observe dans les
Ref. 102 détecteurs d'ondes gravitationnelles et dans les jonctions Josephson. Dans le premier cas, on observe une masse, qui peut aller jusqu'à 1000 kg, dans une superposition d'états situés en différents point de l'espace, séparés par une distance de l'ordre de 10^{-17} m. Dans le deuxième cas, on a utilisé des anneaux supraconducteurs pour produire des superpositions entre un état pour lequel un courant électrique macroscopique de l'ordre de 1 pA circule dans le sens des aiguilles d'une montre, et un autre pour lequel le courant circule
Ref. 113 dans le sens inverse.

* *

Pour plusieurs matériaux, il a été observé des superpositions d'aimantations dans les

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 114 deux directions «up» et «down» en même temps.

* *

Depuis les années 1990, un sport a pris son essor à travers le monde, il consiste à trouver et à jouer avec des nouveaux systèmes placés dans des superpositions macroscopiques Ref. 115 cohérentes. Les défis résident dans la rigueur des expériences nécessaires. Celles qui mettent en jeu des *atomes individuels* dans des superpositions d'états sont parmi les plus Ref. 116 populaires.

* *

En 1997, des ondes d'atomes cohérentes ont été extraites d'un nuage d'atomes de Ref. 117 sodium.

* *

Les objets macroscopiques sont habituellement dans des états incohérents. C'est la même situation que dans le cas de la lumière. Le monde est rempli de lumière «macroscopique», c.-à-d. incohérente. La lumière du jour ainsi que toute lumière provenant d'une lampe, d'un feu et d'un ver luisant est incohérente. Seules des sources très spéciales et fabriquées minutieusement, telles que les lasers ou des petites sources ponctuelles, émettent de la lumière cohérente. Seules ces sources permettent d'étudier les effets des interférences. En fait, les termes «cohérent» et «incohérent» proviennent de l'optique, car la différence entre les deux, à savoir la capacité à interférer, avait été observée dans le cas de la lumière plusieurs siècles avant qu'il ne le soit dans le cas de la matière.

La cohérence et l'incohérence se manifestent de façon différente lorsqu'elle concerne la lumière ou la matière, parce que la matière peut rester immobile alors que la lumière ne le peut pas, mais également parce que la matière est constituée de fermions alors que Page 158 la lumière est constituée de bosons. La cohérence peut s'observer facilement dans les systèmes composés de bosons, comme la lumière, le son dans les solides ou les paires d'électrons dans les supraconducteurs. Elle est moins facilement observable dans les systèmes de fermions, tels que les systèmes d'atomes avec leurs nuages électroniques. Cependant, dans les deux cas, il est possible de définir un temps de décohérence. Dans les deux cas, pour les systèmes composés d'un grand nombre de particules, la meilleure façon d'observer la cohérence est lorsque toutes les particules sont dans le même état (supraconductivité, lumière laser). De plus, dans les deux cas, la transition de la cohérence vers la décohérence est due à l'interaction avec un thermostat. Un faisceau est donc incohérent si ses particules arrivent aléatoirement en temps et en fréquence. Dans la vie quotidienne, la rareté de l'observation de superpositions de la matière cohérente a la même origine que la rareté de l'observation de la lumière cohérente.

* *

Nous discuterons de la relation entre l'environnement et la *désintégration* des systèmes Vol. V, page 47 instables plus loin. Le phénomène est complètement décrit par la décohérence.

* *

Défi 129 pe Pouvez-vous trouver une méthode pour mesurer le *degré* d'intrication? Pouvez-vous le faire pour un système constitué de nombreuses particules?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

L'étude de l'intrication conduit à une conclusion simple: *la téléportation contredit la corrélation*. Pouvez-vous le confirmer?

Défi 130 pe

* *

Les images fantômes des téléviseurs, souvent dues à des réflexions parasites, sont-elles des exemples d'interférences?

Défi 131 e

* *

Que se passe-t-il lorsque deux électrons monochromatiques se superposent?

Défi 132 d

* *

Certains disent que la théorie quantique pourrait être utilisée pour fabriquer des ordinateurs quantiques, en utilisant des superpositions cohérentes de fonctions d'onde. Pouvez-vous donner une raison générale qui rende cet objectif très difficile (bien qu'il ne soit pas impossible) même sans savoir comment un tel ordinateur quantique fonctionne, ni ce que sont les fameux *qubits*?

Ref. 118

Défi 133 e

Pourquoi est-ce que les probabilités et l'effondrement des fonctions d'onde apparaissent lors des mesures?

Les mesures en mécanique quantique sont également déroutantes parce qu'elles conduisent à des énoncés dans lesquels apparaissent des *probabilités*. Par exemple, on parle de la probabilité de trouver un électron à une certaine distance du noyau de l'atome. Un tel énoncé fait partie d'une catégorie plus générale du genre: «lorsque l'on mesure l'observable A, il y a une probabilité p de trouver le résultat a». Dans ce qui suit, nous allons montrer que les probabilités évoquées dans ces énoncés sont inévitables pour n'importe quelle mesure, parce que, comme nous allons le montrer, (1) n'importe quelle mesure et n'importe quelle observation est un cas particulier de processus de décohérence ou de désintrication et (2) tous les processus de décohérence font intervenir le quantum d'action. (Historiquement, le processus de mesure avait été étudié *avant* celui, plus général, de décohérence. Ceci explique en partie pourquoi le sujet est si confus dans l'esprit de beaucoup de gens.)

Qu'est-ce qu'une mesure? Comme nous l'avons déjà mentionné plus tôt, une mesure est n'importe quelle interaction qui produit un enregistrement ou une mémorisation. (Tout effet de la vie quotidienne est un enregistrement, mais ceci n'est pas vrai dans le cas général. Pouvez-vous donner des exemples d'effets qui sont des enregistrements et d'autres qui n'en sont pas?) Des mesures peuvent être réalisées par des machines. Lorsqu'elles sont réalisées par des personnes, on les appelle des *observations*. En théorie quantique, le processus de mesure n'est pas aussi simple qu'en physique classique. Ceci se voit de manière particulièrement frappante lorsqu'un système quantique, tel qu'un électron individuel, est d'abord envoyé à travers une fente de diffraction, ou encore mieux, à travers une double fente (de façon à rendre apparent son aspect ondulatoire), pour le faire ensuite percuter une plaque photographique (de façon à faire également apparaître son aspect particulaire). L'expérience montre que le point noirci, l'endroit où l'électron a percuté l'écran, ne peut pas être déterminé à l'avance. (Ceci est

Vol. III, page 267

Défi 134 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

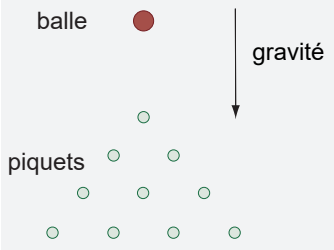


FIGURE 75 Un système montrant un comportement probabiliste: une balle tombant à travers un réseau de piquets horizontaux.

également vrai pour des photons ou pour n'importe quel autre type de particules.) En revanche, pour des grands nombres d'électrons, la distribution spatiale des points noirs, la *figure de diffraction*, peut être calculée à l'avance avec une grande précision.

Le résultat des expériences sur les systèmes microscopiques nous oblige donc à utiliser les probabilités pour décrire les microsystèmes. Nous trouvons que la distribution de probabilité $p(\boldsymbol{x})$ des points d'impact sur la plaque photographique peut se calculer à partir de la fonction d'onde ψ de l'électron à la surface de l'écran et qu'elle est donnée par $p(\boldsymbol{x}) = |\psi^\dagger(\boldsymbol{x})\psi(\boldsymbol{x})|^2$. Ceci est en fait un cas particulier de la *première propriété des mesures quantiques*:

▷ La mesure d'une observable A pour un système dans un état ψ produit un résultat qui est l'une des valeurs propres a_n, et la probabilité P_n d'obtenir le résultat a_n est donné par

$$P_n = |\varphi_n^\dagger \psi|^2 \,, \tag{79}$$

où φ_n est la fonction propre de l'opérateur A qui correspond à la valeur propre a_n.*

Les expériences montrent également une *deuxième propriété des mesures quantiques*:

▷ Après une mesure, le système quantique que l'on observe est dans l'état propre φ_n correspondant à la valeur propre a_n mesurée. On dit également que lors de la mesure, la fonction d'onde s'est *effondrée* de ψ vers φ_n.

Ref. 119

Ces deux propriétés expérimentales peuvent également s'étendre aux cas plus généraux des valeurs propres dégénérées et continues.

De toute évidence, les résultats expérimentaux sur le processus de mesure nécessitent une explication. À première vue, le type de probabilités que l'on rencontre en théorie quantique est différentes de celui de la vie quotidienne. Prenez une roulette, un dé, le système que montre la Figure 75, les machines pachinko ou encore la direction vers laquelle

* Toutes les transformations linéaires transforment certains vecteurs spéciaux, que l'on appelle des *vecteurs propres*, en des multiples d'eux-mêmes. Autrement dit, si T est une transformation, si e est un vecteur et si on a

$$T(e) = \lambda e \tag{80}$$

où λ est un scalaire, alors le vecteur e est appelé un *vecteur propre* de T, et λ est la *valeur propre* associée. L'ensemble de toutes les valeurs propres d'une transformation T s'appelle le *spectre* de T.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

un crayon reposant sur sa pointe va tomber: dans tous les cas, les mesures expérimentales montrent avec un grand niveau de précision que les résultats sont aléatoires (en supposant qu'il n'y ait pas de triche de la part du fabricant ou des opérateurs). Ces systèmes de notre quotidien ne nous intriguent pas pour autant. Inconsciemment, nous supposons que le résultat aléatoire provient des petites variations incontrôlables des conditions de départ ou de l'environnement chaque fois que l'on reproduit l'expérience.*

Mais les systèmes microscopiques semblent être différents. Les deux propriétés des mesures quantiques que nous venons de mentionner expriment ce que les physiciens observent lors de toutes les expériences, même si les conditions initiales sont *exactement* les même à chaque fois. Mais alors, pourquoi la position d'un seul électron, de même que la plupart des autres observables des systèmes quantiques, n'est-elle pas prévisible? Autrement dit, que se passe-t-il lors de l'effondrement de la fonction d'onde? Combien de temps cet effondrement prend-t-il? Aux débuts de la théorie quantique, il régnait cette perception que l'imprévisibilité des observations devait être due au manque d'information concernant l'état de la particule. Ceci a conduit de nombreux physiciens à rechercher ce que l'on appelait des «variables cachées». Mais toutes ces tentatives étaient vouées à l'échec. Il a fallu un certain temps à la communauté scientifique pour se rendre compte que l'imprévisibilité n'était *pas* due au manque d'information sur l'état de la particule, qui est en effet *complètement* décrit par le vecteur d'état ψ.

Pour pouvoir découvrir l'origine des probabilités, rappelons quelle est la nature d'une mesure, ou encore mieux, d'une observation en général:

▷ Toute observation est la production d'un enregistrement.

L'enregistrement peut être une mémoire visuelle ou auditive dans notre cerveau, ou bien un enregistrement écrit sur du papier, ou encore par un magnétophone, ou tout autre objet de ce type. Comme nous l'avons expliqué dans le volume précédent, un objet est un enregistrement s'il n'a pas pu apparaître ou disparaître par chance. Pour éliminer l'influence de la chance, tous les enregistrements doivent être protégés du mieux possible du monde *extérieur*. C'est pour cela que l'on place généralement les archives dans des bâtiments protégés contre les tremblements de terre et contre les incendies, que l'on conserve les documents dans un coffre-fort, que l'on évite autant que possible les lésions cérébrales, etc.

Vol. III, page 265

En plus de cela, les enregistrements doivent être protégés de leurs fluctuations *internes*. Ces fluctuation internes sont dues aux nombreux composants qui constituent n'importe quel appareil d'enregistrement. Si les fluctuations étaient trop importantes, elles rendraient impossible la distinction entre les contenus possibles d'une mémoire. Or, les fluctuations diminuent lorsque la taille d'un système augmente, typiquement comme la racine carrée de la taille. Par exemple, si une écriture à la main est trop petite, il est difficile de la lire si le papier devient friable. Ou encore, si les pistes magnétiques sur les bandes d'une cassette sont trop petites, elles peuvent se démagnétiser et perdre l'information qui y est stockée. Autrement dit, pour produire un enregistrement stable contre les fluctua-

* Pour apprécier les limites de ces hypothèses inconscientes, vous pouvez lire l'histoire, déjà mentionnée, de ces physiciens qui ont construit une machine capable de prédire le résultat d'une bille de roulette à partir de la vitesse initiale que lui communique le croupier.

Vol. I, page 127

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

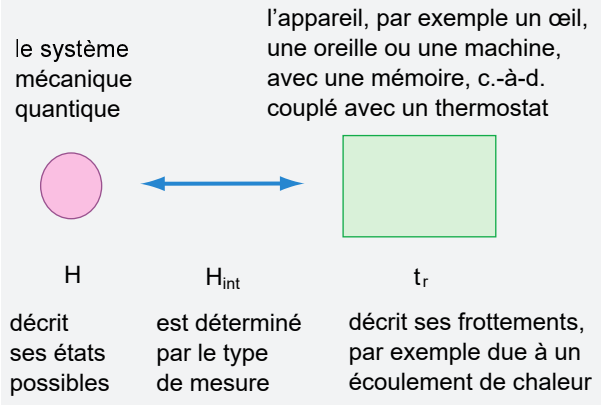


FIGURE 76 Les concepts utilisés pour la description des mesures.

tions internes, il faut qu'il ait une taille suffisante. Tout enregistrement est donc constitué de nombreux composants et est le siège de petites fluctuations.

On peut exprimer l'importance de la taille d'une autre façon: tout système ayant une mémoire, c.-à-d. tout système capable de produire un enregistrement, contient un *thermostat*. En résumé, l'affirmation selon laquelle toute observation consiste à produire un enregistrement peut être exprimée plus précisément par:

▷ Toute observation d'un système est le résultat d'une interaction entre ce système et un thermostat dans l'appareil d'enregistrement.

D'ailleurs, puisque les thermostats impliquent des frottements, on peut également dire: une mémoire a besoin de frottements. De plus, toute observation mesurant une grandeur physique utilise une interaction qui *dépend* de cette même grandeur. Avec ces remarques apparemment triviales, il est possible de décrire plus en détails le processus d'observation, ou, comme on l'appelle généralement en théorie quantique, le processus de mesure.

Tout *appareil* de mesure (ou *détecteur*) se caractérise par deux aspects principaux, qu'illustre la Figure 76: l'interaction qu'il a avec le système microscopique et le thermostat qu'il contient pour produire l'enregistrement. Toute description du processus de mesure est donc une description de l'évolution du système microscopique *et* du détecteur. On a donc besoin de l'hamiltonien de la particule, de l'hamiltonien de l'interaction et des propriétés du thermostat (tel que le temps de relaxation t_r). L'interaction spécifie ce qui est mesuré et le thermostat réalise la mémorisation.

Ref. 120

Nous savons que seuls les systèmes thermodynamiques classiques peuvent être irréversibles; les systèmes quantiques ne le sont pas. On en conclut donc qu'un système de mesure *doit* être décrit de façon classique, sinon il n'aurait pas de mémoire et ne serait pas un système de mesure: il ne produirait donc pas d'enregistrement! La mémoire est un effet classique. (Plus précisément, la mémoire est un effet qui n'apparaît que dans la limite classique.) Néanmoins, voyons ce qui se passe lorsque nous décrivons le système de mesure à l'aide de la mécanique quantique.

Appelons A l'observable que l'on mesure lors de l'expérience et φ_n ses fonctions

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

propres. Le système que l'on observe (souvent une particule) est décrit en mécanique quantique par un état ψ. L'état complet du système peut toujours s'écrire sous la forme

$$\psi = \psi_p \, \psi_{\text{autre}} = \sum_n c_n \varphi_n \, \psi_{\text{autre}} \, . \tag{81}$$

Ici, ψ_p est l'aspect de l'état (de la particule ou du système) que l'on veut mesurer, et ψ_{autre} représente tous les autres degrés de liberté, c.-à-d. ceux qui ne sont pas décrits (*engendrés*, en langage mathématique) par l'opérateur A correspondant à l'observable que l'on veut mesurer. Les nombres $c_n = |\varphi_n^\dagger \psi_p|$ fournissent l'expansion de l'état ψ_p, que l'on supposera normalisée, en termes de la base φ_n. Par exemple, lors de la mesure typique d'une position, les fonctions φ_n seraient les fonctions propres de la position et ψ_{autre} contiendrait les informations relatives à la quantité de mouvement, au spin et à toute autre propriétés de la particule.

À quoi ressemble l'interaction entre le système et le détecteur? Appelons l'état de l'appareil avant la mesure $\chi_{\text{début}}$. L'appareil de mesure lui-même, par définition, est un dispositif qui, lorsqu'il est percuté par une particule dans l'état $\varphi_n \psi_{\text{autre}}$, passe de l'état $\chi_{\text{début}}$ à l'état χ_n. On dit alors que l'appareil a *mesuré* la valeur propre a_n correspondant à la fonction propre φ_n de l'opérateur A. L'indice n est donc l'enregistrement de la mesure; on l'appelle l'indice *pointeur*. Cet indice nous dit dans quel état le système microscopique se trouvait avant l'interaction. Le point important, que l'on déduit de notre discussion précédente, est que les états χ_n, puisqu'ils sont des enregistrements, sont distincts sur le plan macroscopique, précisément au sens de la section précédente. S'ils ne l'étaient pas, ils ne seraient pas des enregistrements, et l'interaction avec le détecteur ne serait pas une mesure.

Bien sûr, au cours de la mesure, l'appareil sensible à φ_n change la partie ψ_{autre} de l'état de la particule en une autre situation $\psi_{\text{autre},n}$, qui dépend de la mesure et de l'appareil; nous n'avons pas besoin de le spécifier dans la discussion qui suit.* Mais faisons une vérification intermédiaire de notre raisonnement. Est-ce que des appareils tels que nous les décrivons ici existent? Oui, il en existe. Par exemple toute plaque photographique est un détecteur de position pour particules ionisantes. Une plaque photographique, et plus généralement n'importe quel appareil mesurant des positions, fait cette détection en modifiant sa quantité de mouvement d'une façon qui dépend de la position mesurée: l'électron est arrêté par la plaque photographique. Dans ce cas, $\chi_{\text{début}}$ est une plaque entièrement blanche, φ_n serait une particule localisée au point n, χ_n est la fonction décrivant une plaque noircie au point n et $\psi_{\text{autre,n}}$ décrit la quantité de mouvement et le spin

* À quoi ressemble l'interaction sur le plan mathématique? À partir de la description que l'on vient de donner, nous avons spécifié l'état final pour chaque état initial. Puisque les deux matrices densité sont liées par

$$\rho_{\text{f}} = T \rho_{\text{i}} T^\dagger \tag{82}$$

Défi 135 pe nous pouvons en déduire l'hamiltonien à partir de la matrice T. Pouvez-vous voir comment?

Au passage, notons que l'on peut généralement dire qu'un appareil mesurant une observable A possède un hamiltonien d'interaction entre le système et le détecteur qui dépend de la variable pointeur A, et pour lequel on a

$$[H + H_{\text{int}}, A] = 0 \, . \tag{83}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de la particule après qu'elle a percuté la plaque photographique au point n.

Nous sommes maintenant prêts à regarder le processus de mesure lui-même. Pour l'instant, ignorons le thermostat dans le détecteur, et décrivons simplement le détecteur lui aussi avec un état, que nous appelons $\chi_{\text{début}}$. Avant l'interaction entre la particule et le détecteur, le système combiné (incluant le détecteur) se trouvait dans l'état initial ψ_i donné simplement par

$$\psi_i = \psi_p \chi_{\text{début}} = \sum_n c_n \varphi_n \psi_{\text{autre}} \chi_{\text{début}} \,, \tag{84}$$

où ψ_p est l'état de la particule (du système). Après l'interaction, en utilisant les caractéristiques de l'appareil, connues expérimentalement et que nous venons juste de mentionner, l'état combiné ψ_a est

$$\psi_a = \sum_n c_n \varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n \,. \tag{85}$$

Cette évolution de ψ_i vers ψ_a est obtenue lorsque l'on applique l'équation d'évolution à l'ensemble formé par la particule et le détecteur. Or, l'état combiné ψ_a est une superposition d'états distincts sur le plan macroscopique: c'est une superposition d'états macroscopiques distincts du détecteur. Dans notre exemple, ψ_a pourrait correspondre à une superposition entre un état pour lequel un point situé en haut à gauche de la plaque, par ailleurs blanche, serait noirci, et un autre état pour lequel un point situé en bas à droite de la plaque, par ailleurs blanche, serait noirci. Une telle situation n'est jamais observée. Voyons pourquoi.

La matrice densité ρ_a de l'état combiné ψ_a après la mesure est donnée par

$$\rho_a = \psi_a \otimes \psi_a^\dagger = \sum_{n,m} c_n c_m^* (\varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n) \otimes (\varphi_m \psi_{\text{autre},m} \chi_m)^\dagger \,. \tag{86}$$

Elle contient des termes non diagonaux, c.-à-d. les termes pour lesquels $n \neq m$, et dont la valeur numérique est différente de zéro. Maintenant, réintroduisons le thermostat. Depuis la section précédente nous connaissons l'effet d'un thermostat sur une telle superposition macroscopique. Nous avons trouvé qu'une matrice densité telle que ρ_a perdait sa cohérence extrêmement rapidement. Nous supposerons ici que le temps de décohérence est petit et négligeable.* Après la décohérence, les termes non diagonaux s'annulent, et seule la matrice densité diagonale finale ρ_{f}, donnée par

$$\rho_{\text{f}} = \sum_n |c_n|^2 (\varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n) \otimes (\varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n)^\dagger \,. \tag{87}$$

reste, et elle a une pertinence expérimentale. Comme nous l'avons expliqué plus haut,

* Notez cependant qu'un temps de décohérence *strictement* nul (ce qui signifierait un nombre de degrés de liberté *strictement* infini pour le thermostat ou pour l'environnement) est en contradiction avec l'équation d'évolution, et en particulier avec l'unitarité, la localité et la causalité. Il est essentiel dans toute cette discussion de ne pas confondre les conséquences logiques d'un temps de décohérence extrêmement petit avec celles d'un temps de décohérence strictement nul.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

une telle matrice densité décrit un état mixte et les nombres $P_n = |c_n|^2 = |\varphi_n^\dagger \psi_p|^2$ fournissent la probabilité de mesurer la valeur a_n et de trouver la particule dans l'état $\varphi_n \psi_{\text{autre,n}}$ ainsi que le détecteur dans l'état χ_n. Mais ceci est exactement ce que les deux propriétés de la mesure quantique établissent.

Nous trouvons donc que lorsque l'on décrit une mesure comme une évolution d'un système quantique en interaction avec un détecteur macroscopique, lui-même contenant un thermostat, nous pouvons en *déduire* les deux propriétés de mesure quantique (le résultat probabiliste et l'effondrement de la fonction d'onde) à partir de l'équation d'évolution de la mécanique quantique. Le temps de décohérence t_d de la section précédente devient le temps d'effondrement dans le cas d'une mesure. De plus, nous trouvons que

$$t_\text{effondrement} = t_\text{d} < t_\text{r} \,. \tag{88}$$

Autrement dit, le temps d'effondrement est toujours plus petit que le temps de relaxation du thermostat. Nous avons donc une formule exprimant le temps qu'il faut à la fonction d'onde pour s'effondrer. Toutes les mesures expérimentales de temps d'effondrement ont confirmé ce résultat. Ref. 104

Pourquoi $\hbar$ est-il nécessaire aux probabilités?

À première vue, on pourrait prétendre que les deux propriétés des mesures quantiques ne font pas intervenir $\hbar$, et qu'elles ne sont donc pas des conséquences de la théorie quantique. Mais cet argument est incorrect.

La décohérence est un processus quantique, parce que $\hbar$ apparaît dans l'expression du temps de décohérence. Puisque l'effondrement de la fonction d'onde est basé sur la décohérence, c'est également un processus quantique. Les probabilités sont, elles aussi, dues au quantum d'action.

De plus, nous avons vu que le concept de fonction d'onde apparaissait uniquement parce que le quantum d'action $\hbar$ n'était pas nul. Les fonctions d'onde, leur effondrement et les probabilités sont dues au quantum de changement $\hbar$. Page 98

Ces résultats nous rappellent une affirmation que nous avons faite plus tôt: les probabilités apparaissent chaque fois qu'une expérience tente de détecter des changements (c.-à-d. des valeurs d'action) plus petites que $\hbar$. La plupart des casse-têtes que l'on se pose concernant les mesures sont dus à de telles tentatives. Cependant, la nature ne permet pas de telles mesures, et à chaque tentative des probabilités apparaissent. Page 35 Défi 136 f

Les variables cachées

De nombreuses personnes ne sont pas satisfaites avec les explications concernant les probabilités du monde quantique. Elles aspirent à plus de mystère dans la théorie quantique. Elles n'aiment pas l'idée que les probabilités puissent être dues aux thermostats et au quantum d'action. Le préjudice le plus célèbre que ces personnes cultivent est l'idée que les probabilités sont dues à certains aspects cachés de la nature qui seraient encore inconnus des humains. Ce sont ces aspects imaginaires et inconnus que l'on appelle les *variables cachées*.

La beauté de la mécanique quantique est qu'elle permet des tests aussi bien conceptuels qu'expérimentaux sur la question de savoir si ces variables cachées existent (sans

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

même avoir besoin de les connaître). De toute évidence, des variables cachées contrôlant l'évolution des systèmes microscopiques contredirait l'affirmation que des valeurs d'action plus petites que $\hbar$ ne peuvent pas être détectées. La valeur d'action observable minimale est la raison même du comportement aléatoire des systèmes microscopiques. L'action minimale *exclue* donc les variables cachées. Mais essayons d'ajouter quelques arguments plus détaillés à la question.

Chronologiquement, le premier argument, quelque peu abstrait, contre les variables cachées a été fourni par John von Neumann.* Plus tard, un théorème d'impossibilité (appelé également théorème «no-go» [N.d.T.]) pour les variables cachées a été publié
Ref. 121 par Kochen et Specker en 1967, et indépendamment par John Bell en 1969. Le théorème établit que

▷ Des variables cachées non conceptuelles sont impossible si l'espace de Hilbert est de dimension supérieure ou égale à trois.

Le théorème concerne des variables *non contextuelles*, c.-à-d. des variables cachées *à l'intérieur* du système mécanique quantique. Le théorème de Kochen et Specker établit donc qu'il n'y a pas de modèle de variables cachées non contextuelles, parce que les mathématiques l'interdisent. Ce résultat élimine essentiellement toutes les possibilités de variables cachées, parce que les systèmes mécaniques quantiques habituels portent sur des espaces de Hilbert de dimensions supérieures à trois.

Il nous est impossible de ne pas constater qu'il n'existe pas de théorèmes restrictifs en ce qui concerne les variables cachées *conceptuelles*, c.-à-d. les variables de l'environnement et tout particulièrement celles des thermostats qu'il contient. En effet, nous avons montré leur nécessité plus haut!

Le bon sens élimine également les variables cachées, sans avoir recours aux mathématiques, avec un argument simple. Si un système mécanique quantique avait des variables internes cachées, l'appareil de mesure en aurait des quantités astronomiques.** Et cela signifierait qu'il ne pourrait pas fonctionner en tant que système de mesure.

Malgré tous les arguments, des chercheurs se sont toujours évertués à produire des tests expérimentaux sur les variables cachées. La plupart des tests sont basés sur la célèbre *inégalité de Bell*, une relation élégante et simple publiée par John Bell*** dans les années 1960.

Peut-on distinguer la théorie quantique et les théories réalistes locales qui utilisent des variables cachées? L'idée de départ de Bell était de le faire en mesurant la polarisation

* János Neumann (Budapest, 1903 – Washington DC, 1957) était un mathématicien influent. Un des esprits scientifiques les plus grands et les plus clairvoyants du XXe siècle, il résolut de nombreux problèmes, tout particulièrement en mathématique appliquée et en théorie quantique, qui continuent de nos jours à créer des difficultés à beaucoup de gens. Il travailla ensuite sur les bombes atomiques et à hydrogène, dans le domaine des missiles balistiques et sur des problèmes de défense en général. Au cours de la recherche sur les bombes, il a fortement influencé la construction des premiers ordinateurs électroniques, élargissant les idées de Konrad Zuse. Vers la fin de sa vie, il voulait modifier la météorologie en utilisant des bombes nucléaires. Il mourut d'un cancer qu'il contracta à la suite des radiations auxquelles il avait été exposé alors qu'il surveillait les tests des bombes nucléaires.

** Conduisant à la définition: une quantité astronomique est égale à 10^{23}.

*** John Stewart Bell (1928 – 1990), physicien théoricien qui travailla principalement sur les fondements de la théorie quantique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de deux photons corrélés. La théorie quantique dit que la polarisation des photons est fixée uniquement au moment où elle est mesurée, alors que les modèles réalistes locaux (le type de modèles de variables cachées le plus simple) prétendent que la polarisation est déjà fixée à l'avance par une variable cachée. Comme Bell le découvrit, il est possible d'utiliser des expériences pour déterminer laquelle des alternatives est correcte.

Imaginez que la polarisation soit mesurée en deux points distants A et B. Chaque observateur peut mesurer 1 ou −1 dans chacune de ses directions favorites. Supposons que chaque observateur choisisse deux directions, 1 et 2, et qu'ils appellent leurs résultats a_1, a_2, b_1 et b_2. Puisque les résultats de mesure ont tous pour valeur 1 ou −1, l'expression spécifique $(a_1 + a_2)b_1 + (a_2 - a_1)b_2$ a toujours pour valeur ±2.

Ref. 122 Imaginez que vous répétiez l'expérience de nombreuses fois, en supposant que les variables cachées apparaissent aléatoirement. Vous pouvez alors en déduire (un cas par-

Défi 137 f ticulier de) l'inégalité de Bell pour deux *variables cachées*. Elle prédit que

$$|(a_1 b_1) + (a_2 b_1) + (a_2 b_2) - (a_1 b_2)| \leqslant 2 \,. \tag{89}$$

Ici, les expressions entre parenthèses sont les moyennes des produits des mesures sur un grand nombre d'échantillons. Cette prédiction de variables cachées est valide indépendamment des directions des polariseurs impliqués.

D'autre part, dans le cas où les polariseurs 1 et 2 placés en A et leurs équivalents placés en B sont choisis à un angle $\pi/4$, la *théorie quantique* prédit que

$$|(a_1 b_1) + (a_2 b_1) + (a_2 b_2) - (a_1 b_2)| = 2\sqrt{2} > 2 \,. \tag{90}$$

Cette prédiction est en contradiction totale avec la prédiction de variables cachées.

Or, toutes les vérifications expérimentales de l'inégalité de Bell ont confirmé la mécanique quantique standard et falsifié les variables cachées. Il n'y a aucune exception.

Une autre contradiction mesurable entre la théorie quantique et les théories réalistes locales a été prédite par Greenberger, Horn et Zeilinger pour des systèmes de trois par-

Ref. 123 ticules intriquées. Encore une fois, la théorie quantique a été confirmée lors de toutes les expériences.

En résumé, *les variables cachées n'existent pas*. Bien sûr, ceci n'est pas réellement une surprise. La recherche des variables cachées est basée sur une mauvaise compréhension de la mécanique quantique ou sur des désirs personnels sur la façon dont le monde devrait être, au lieu de le prendre tel qu'il est: il existe une valeur d'action minimale $\hbar$ dans la nature.

Résumé sur les probabilités et le déterminisme

> Geometrica demonstramus quia facimus; si physica demonstrare possemus, faceremus.
>
> Giambattista Vico*

* «Nous pouvons démontrer les choses géométriques parce que nous les faisons; si nous pouvions démontrer les choses physiques, nous pourrions les faire.» Giovan Battista Vico (Naples, 1668 – Naples 1744), philosophe et penseur important. Dans cette phrase célèbre, il soulignait une distinction fondamentale entre les mathématiques et la physique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nous tirons ici un certain nombre de conclusions qui vont nous servir au cours du reste de notre ascension de la montagne. Notez que ces conclusions, bien qu'elles soient en accord avec toutes les expériences, ne sont pas encore partagées par tous les physiciens! L'ensemble du sujet est un problème pour les personnes qui préfèrent l'idéologie aux faits.

Dans la vie quotidienne, bien souvent, les probabilités n'apparaissent pas ou ne sont pas remarquées. La théorie quantique montre que

- ▷ Les probabilités apparaissent chaque fois qu'un processus essaye de faire la distinction entre des situations qui diffèrent d'environ un quantum d'action $\hbar$.
- ▷ Le mécanisme précis de l'apparition des probabilités est dû aux thermostats concernés.

En bref, les probabilités apparaissent chaque fois qu'une expérience tente de faire la distinction entre des *situations proches*. Pour plus de détails:

— Les probabilités apparaissent lors des mesures, non pas parce que l'état du système quantique est inconnu ou flou, mais parce que le système interagit avec un thermostat de l'environnement dont l'état n'est pas connu avec précision. Les probabilités de la mécanique quantique ont une origine statistique et sont dues aux thermostats de l'environnement ou des appareils de mesure, en combinaison avec le quantum d'action $\hbar$. Les probabilités sont dues au grand nombre de degrés de liberté contenus dans le thermostat. Ce grand nombre rend imprévisible le résultat des expériences (tout particulièrement celles dont les résultats possibles diffèrent d'environ $\hbar$). Si l'état du thermostat concerné était connu, le résultat d'une expérience pourrait être prédite. Les probabilités de la théorie quantique sont dues au quantum d'action et ont une origine thermodynamique.

  Autrement dit, il n'y a *pas de probabilités fondamentales* dans la nature. Toutes les probabilités de la nature sont dues à la décohérence. En particulier, toutes les probabilités sont dues à la statistique des nombreuses particules (certaines d'entre elles pouvant même être virtuelles) qui constituent les thermostats de l'environnement. En modifiant les mots bien connus d'Albert Einstein, nous pouvons nous mettre d'accord sur ce qui suit: «la nature ne joue pas aux dés.» En conséquence, nous appelons ψ la *fonction d'onde* (plutôt que «l'amplitude de probabilité», telle qu'elle est souvent appelée). Un terme encore meilleur serait la *fonction d'état*.

— Chaque observation de la vie quotidienne est un cas particulier de décohérence. Ce qui est habituellement appelé «l'effondrement de la fonction d'onde» est un processus de décohérence dû à l'interaction avec les thermostats présents dans l'environnement ou dans les appareils de mesure. Parce que les êtres humains ont le sang chaud et qu'ils ont une mémoire, ils sont eux-mêmes des appareils de mesure. Le fait que notre corps ait une température de 37°C est donc la raison pour laquelle nous ne voyons qu'un seul monde, et non pas des superpositions. (En réalité, il existe de nombreuses autres raisons. Pouvez-vous en nommer quelques-unes?)

Défi 138 e

— Toute mesure se termine lorsque le système microscopique a interagi avec le thermostat contenu dans l'appareil de mesure. La théorie quantique en tant que descrip-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tion de la nature ne nécessite pas de détecteurs; l'équation d'évolution décrit tous les exemples de mouvement. Cependant, les *mesures* nécessitent l'existence de détecteurs. Un détecteur (un appareil de mesure) est une machine qui enregistre les observations. En conséquence, il doit inclure un thermostat, c.-à-d. qu'il doit être un objet classique, macroscopique. Dans ce contexte, on parle également d'un *appareil classique*. Cette nécessité qu'a un appareil de mesure à être classique avait déjà été soulignée lors des toutes premières étapes de la théorie quantique.

— Toutes les mesures, puisqu'elles sont des processus de décohérence impliquant des interactions avec des thermostats, sont des processus irréversibles et elles augmentent l'entropie.

— Chaque mesure, comme tout exemple de décohérence, est un cas particulier d'évolution en mécanique quantique, à savoir l'évolution de la combinaison entre un système quantique, un détecteur macroscopique et un thermostat. L'équation d'évolution étant invariante sur le plan de la relativité, aucun problème de causalité n'apparaît dans les mesures, de même que n'y apparaissent aucun problème de localité et aucun problème de logique.

— Étant donné que l'équation d'évolution et le processus de mesure n'impliquent pas de grandeurs autres que l'espace-temps, les hamiltoniens, les thermostats et les fonctions d'onde, aucune autre grandeur ne joue un rôle lors des mesures. En particulier, aucun observateur humain, ni aucune conscience quelconque n'est impliquée ni nécessaire. Une mesure est terminée lorsque le système microscopique a interagi avec le thermostat de l'appareil. La décohérence inhérente à chaque mesure a lieu même si personne ne regarde. Cette conséquence triviale est en accord avec les observations de la vie quotidienne, par exemple avec le fait que la Lune tourne autour de la Terre même si personne ne la regarde.* De même, un arbre qui tombe au milieu d'une forêt fait du bruit même si personne n'est là pour l'écouter. La décohérence est indépendante de l'observation humaine, de l'esprit humain et de l'existence humaine.

Vol. III, page 339

— Lors de chaque mesure, le système quantique interagit avec le détecteur. Puisqu'il existe une valeur minimale pour l'amplitude de l'action, tout *observation influence la chose observée*. Par conséquent, toute mesure *perturbe* le système quantique. Toute description précise des observations doit également inclure la description de ces perturbations. Dans cette section, la perturbation a été modélisée par le changement de l'état ψ_{autre} du système en $\psi_{\text{autre,n}}$. Sans un tel changement d'état, sans une perturbation du système quantique, aucune mesure ne serait possible.

— Puisque le processus de mesure est décrit entièrement par la mécanique quantique, l'unitarité est, et reste, la propriété fondamentale de l'évolution. Il n'existe pas de processus non unitaires en mécanique quantique.

— La description de l'effondrement de la fonction d'onde comme un processus de décohérence est une explication exactement dans le sens pour lequel le terme «explication» a été défini plus tôt: elle décrit la relation entre une observation et tous les autres aspects de la réalité (c.-à-d. le thermostat du détecteur ou de l'environnement dans notre cas). L'effondrement de la fonction d'onde a été mesurée, calculée et *expliquée*. L'effondrement n'est pas une question «d'interprétation», c.-à-d. d'opinion, comme

Vol. III, page 334

* Le point de vue opposé est parfois faussement attribué à Niels Bohr. La Lune est bien évidemment en contact avec de nombreux thermostat de rayonnement. Pouvez-vous en énumérer quelques-uns?

Défi 139 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

il est malheureusement souvent suggéré.*
— Il ne sert à rien de spéculer sur la possibilité ou non de déterminer l'évolution d'une *seule* mesure quantique si l'état de l'environnement autour du système était connu. Les mesures ont besoin de thermostats. Mais un thermostat est irréversible (à un niveau d'approximation excellent) et ne peut donc pas être décrit par une fonction d'onde, qui se comporte de manière réversible.**

En bref:

- ▷ La mécanique quantique est déterministe.
- ▷ Les thermostats sont probabilistes.
- ▷ Les thermostats sont probabilistes à cause du quantum d'action.

En résumé, il n'y a *pas* d'irrationalité dans la théorie quantique. Quiconque utilise la théorie quantique comme un argument pour des superstitions, des comportements irrationnels, des croyances New Age, ou encore des idéologies est coupable de désinformation. L'affirmation de Gell-Mann au début de ce chapitre en est un exemple. Un autre exemple est la déclaration suivante bien connue, mais incorrecte, de Richard Feynman:

Page 162

Ref. 125

... personne ne comprend la physique quantique.

De toute évidence, un prix Nobel n'empêche pas les vues déformées par l'idéologie. L'affirmation correcte est:

- ▷ Le quantum d'action et la décohérence sont les clefs pour comprendre la théorie quantique.

En fait, $\hbar$ et la décohérence permettent de clarifier de nombreuses autres questions. Explorons-en quelques-unes intéressantes.

Quel est la différence entre l'espace et le temps?

L'espace et le temps diffèrent. Les objets sont localisés dans l'espace mais pas dans le temps. Pourquoi en est-il ainsi? Dans la nature, la plupart des interactions entre un thermostat et un système sont arbitrées par un potentiel. Tous les potentiels dépendent, par définition, de la position. Par conséquent, tout potentiel, parce qu'il est fonction de la position $\boldsymbol{x}$, commute avec l'observable position (et donc avec l'hamiltonien de l'interaction). La décohérence induite par les thermostats (sauf si des précautions particulières sont prises) va donc tout d'abord détruire les éléments non diagonaux de chaque superposition d'états centrés en des endroits différents. En bref, *les objets sont localisés parce qu'ils interagissent avec des thermostats par l'intermédiaire de potentiels*.

* Cela implique que l'interprétation dite des «mondes multiples» est un vœu pieux. La conclusion se confirme lorsque l'on étudie les détails de cette approche religieuse. C'est un système de croyances, non basé sur des faits.

Ref. 124

** Ce type de déterminisme très fort sera défié vigoureusement dans la dernière partie de ce texte, où on montrera que le temps n'est pas un concept fondamental, et donc que le débat autour du déterminisme perd l'essentiel de son intérêt.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Pour la même raison, les objets n'ont qu'une seule orientation spatiale à la fois. Si l'interaction entre le système et le thermostat dépend du spin, le thermostat conduit à une «localisation» du spin. Ceci se produit pour tous les systèmes microscopiques en interaction avec des aimants. Une conséquence est qu'il n'est presque jamais possible d'observer des superpositions macroscopiques d'aimantation. Et puisque les électrons, les protons et les neutrons ont un moment magnétique et un spin, il est possible d'étendre cette conclusion: on ne trouve jamais les objets de la vie quotidienne dans des superpositions d'états de rotation différents, parce que leurs interactions avec les thermostats dépendent du spin.

En revanche, la plupart des systèmes ne sont pas localisés dans le temps, mais ils existent au contraire pendant des périodes de temps très longues, parce que, dans la pratique, toutes les interactions entre un système et un thermostat ne commutent *pas* avec le temps. En fait, c'est ainsi qu'un thermostat est défini en tout premier lieu. En bref, *les objets sont permanents parce qu'ils interagissent avec un thermostat*.

Pouvez-vous trouver une interaction qui dépende de la quantité de mouvement au lieu de dépendre de la position? Quelle est la conséquence pour les systèmes macroscopiques?

Défi 140 e

Autrement dit, contrairement à la relativité générale, la théorie quantique fournit une distinction entre l'espace et le temps. En fait, nous pouvons *définir* la position comme étant l'observable qui commute avec les hamiltoniens des interactions. Cette distinction entre l'espace et le temps est due aux propriétés de la matière et de ses interactions. Nous n'aurions pas pu déduire cette distinction en relativité générale.

Sommes-nous de bons observateurs?

Les êtres humains sont-ils des appareils de mesure classiques? Oui, ils le sont. Même si plusieurs physiciens éminents prétendent que le libre arbitre et les probabilités sont liés, une investigation détaillée montre que ce n'est pas le cas. Nos sens sont des machines classiques parce qu'ils obéissent à leur définition: les sens humains enregistrent les observations en interagissant avec un thermostat. Notre cerveau est également un appareil classique: les neurones sont immergés dans des thermostats. Les probabilités quantiques ne jouent *pas* un rôle déterminant pour le cerveau.

Ref. 126

Toute entité qui observe, qu'elle soit une machine ou un être humain, a besoin d'un thermostat et d'une mémoire pour enregistrer ses observations. Ceci signifie que les observateurs doivent être composés de matière et qu'ils ne peuvent pas être composés de rayonnement. Notre description de la nature est donc fortement biaisée: nous la décrivons du point de vue de la matière. C'est un peu comme si on décrivait les étoiles en plaçant la Terre au centre de l'Univers: nous plaçons toujours la matière au centre de notre description. Est-il possible d'éliminer cet anthropomorphisme de base? Nous le découvrirons en poursuivant notre aventure.

Défi 141 f

Vol. VI, page 83

Quel est le lien entre la théorie de l'information, la cryptologie et la théorie quantique?

Faire de la physique consiste à parler des observations de la nature. Comme toute observation, une mesure produit de l'information. Il est donc possible de traduire une grande partie de la théorie quantique (mais pas toute) dans le langage de la théorie de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'information. En particulier, l'existence d'une valeur de changement minimale dans la nature a plusieurs conséquences: l'information concernant un système physique ne peut jamais être complète; le transport de l'information a ses limites; et on ne peut pas faire entièrement confiance à l'information. Les détails de ces études constituent un moyen fascinant de regarder le monde microscopique.

L'analogie entre la théorie quantique et la théorie de l'information devient encore plus intéressante lorsque les énoncés sont traduits dans le langage de la cryptologie. La cryptologie est la science qui transmet des messages cachés que seul le destinataire prévu peut déchiffrer. À notre époque moderne de surveillance permanente, la cryptologie est un outil important pour protéger la liberté individuelle.*

Ref. 127

Le quantum d'action implique que les messages peuvent être envoyés de façon (presque) fiable. Écouter un message est un processus de mesure. Puisqu'il y a une action minimale $\hbar$, il est possible de détecter si quelqu'un a essayé d'écouter le message que l'on a envoyé. Pour éviter une attaque de la part d'un intercepteur (quelqu'un qui prétend être le récepteur, puis envoie ensuite une copie du message au destinataire réellement prévu) on peut utiliser des systèmes *intriqués* comme signaux (messages) pour transmettre l'information. Si l'intrication est détruite, c'est que quelqu'un a écouté le message. Habituellement, les cryptologues quantiques utilisent des systèmes de communication basés sur des photons intriqués.

Le problème majeur de la *cryptologie quantique* (un vaste domaine de recherche moderne) est la question de la distribution des clefs. Toute communication sécurisée est basée sur une clef secrète qui est utilisée pour décoder le message. Même si le canal de communication est de la plus haute sécurité (comme dans le cas des photons intriqués), encore faut-il trouver un moyen pour envoyer à son partenaire de communication la clé secrète nécessaire au décodage du message. Trouver de tels moyens est l'objectif principal de la cryptologie quantique. Cependant, une investigation approfondie de la question montre que toutes les méthodes d'échange de clefs sont limitées en ce qui concerne leur niveau de sécurité.

En bref, à cause du quantum d'action, la nature impose des limites sur la possibilité d'envoyer des messages codés. L'énoncé de ces limites est (presque) équivalent à celui des limites que le quantum d'action impose aux changements possibles dans la nature.

L'Univers est-il un ordinateur?

Le quantum d'action fournit une limite à la sécurisation des échanges d'information. Ce constat nous permet d'écarter plusieurs affirmations incorrectes que l'on trouve souvent dans les médias. Affirmer que «l'Univers est de l'information» ou que «l'Univers est un ordinateur» est aussi raisonnable que de dire que l'univers est une observation ou un distributeur de chewing-gum. Tout expert du mouvement devrait se méfier de ces déclarations ainsi que d'autres toutes aussi louches. Soit les gens qui les utilisent se trompent eux-mêmes, soit ils essaient de tromper les autres.

Vol. VI, page 109

* La cryptologie englobe le domaine de la *cryptographie* (l'art d'encoder les messages) et le domaine de la *cryptanalyse* (l'art de déchiffrer les messages codés). Pour une bonne introduction à la cryptologie, on pourra se référer au texte par Albrecht Beutelspacher, Jörg Schwenk & Klaus-Dieter Wolfenstätter, *Moderne Verfahren der Kryptographie*, Vieweg 1995.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Est-ce que l'Univers a une fonction d'onde? Est-ce qu'il a des conditions initiales?

Lors des discussions sur la théorie quantique, on entend fréquemment parler de la fonction d'onde de l'Univers. Diverses conclusions sont déduites de cette idée, par exemple concernant l'irréversibilité du temps, l'importance des conditions initiales, les changements nécessaires à la théorie quantique, et bien d'autres. Ces arguments sont-ils corrects?

La première chose à clarifier est la signification du mot «Univers». Comme nous l'avons déjà expliqué, le terme peut avoir deux sens: soit il représente l'ensemble de toute la matière et de tout le rayonnement, soit il représente ce même ensemble *auquel on rajoute* tout l'espace-temps. Rappelons également la signification du terme «fonction d'onde»: elle décrit l'*état* d'un système. L'état permet de faire la distinction entre deux systèmes qui seraient par ailleurs identiques. Par exemple, la position et la vitesse permettent de distinguer deux boules d'ivoire, par ailleurs identiques, sur une table de billard. Alternativement et de façon équivalente, l'état décrit les changements au cours du temps.

Vol. II, page 223

Est-ce que l'Univers a un état? Si on prend la signification la plus large de l'Univers, il n'en a pas. Parler de l'état de l'Univers est une contradiction: le concept d'état, défini comme étant les aspects non permanents d'un objet, ne peut s'appliquer qu'à des *parties* de l'Univers.

Vol. I, page 27

On peut ensuite prendre le sens plus étroit du terme «Univers» (l'ensemble de toute la matière et de tout le rayonnement) et se poser à nouveau la même question. Pour déterminer l'état de toute la matière et de tout le rayonnement, il nous faut un moyen pour le mesurer: pour cela il nous faut un environnement. Mais le seul environnement de la matière et du rayonnement est l'espace-temps. Il n'est pas possible de déterminer des conditions initiales, car il nous faudrait des mesures pour pouvoir le faire, et donc un instrument. Un instrument est un système matériel auquel est attaché un thermostat, mais il n'existe pas de tel système en dehors de l'Univers.

En bref, la théorie quantique ne permet pas de faire des mesures de l'Univers.

▷ L'Univers n'a pas d'état.

Méfiez-vous de quiconque qui prétendrait connaître quelque chose à propos de la fonction d'onde de l'Univers. Posez-lui simplement la question de Wheeler: si vous connaissez la fonction d'onde de l'Univers, pourquoi n'êtes-vous pas riche?

Malgré cette conclusion, plusieurs physiciens célèbres ont proposé des équations d'évolution pour la fonction d'onde de l'Univers. (Ironiquement, la plus connue est l'équation de Wheeler-DeWitt.) Cela peut sembler quelque peu absurde, mais aucune prédiction de ces équations n'a été comparée à des expériences. Les arguments que l'on vient juste de donner rendent même cela impossible dans le principe. L'exploration de ces équations peut sembler intéressantes à première vue, mais il faut donc l'éviter si nous voulons terminer notre aventure sans nous perdre dans des croyances erronées.

Ref. 128

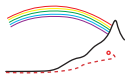
Il y a beaucoup d'autres perversions concernant cette histoire. L'une d'elles est que l'espace-temps lui-même, sans la matière, pourrait être un thermostat. On montrera que cette spéculation est correcte lors du dernier volume de cette aventure. Le résultat semble

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

permettre de pouvoir parler de la fonction d'onde de l'Univers. Mais là encore, il s'avère que le temps est *indéfini* aux échelles pour lesquelles l'espace-temps est un thermostat efficace. Ceci implique, encore une fois, que la notion d'état n'est pas applicable dans ce cas.

L'absence d'un «état» de l'Univers est une affirmation importante. Elle implique également l'absence de conditions initiales! Les arguments sont essentiellement les mêmes. C'est un résultat difficile. Nous sommes tellement habitués à penser que l'univers a des conditions initiales que nous ne remettons jamais en question le terme. (L'erreur peut même apparaître de temps en temps dans ce texte.) Mais l'Univers n'a pas de conditions initiales.

En guise de résumé, on peut retenir ceci (valide même à la lumière des dernières recherches): l'Univers n'est *pas* un système, il n'a *pas* de fonction d'onde et il n'a *pas* de conditions initiales, indépendamment de ce que l'on entend par «Univers».



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 8

Les couleurs et autres interactions entre la lumière et la matière

« Rem tene; verba sequentur.** »

Les pierres et tous les autres objets ont des couleurs. Pourquoi? Autrement dit, par quel moyen spécifique les particules quantiques chargées que l'on trouve à l'intérieur des pierres, et à l'intérieur de tous les autres objets, interagissent-elles avec les champs électromagnétiques? Dans ce chapitre, nous allons d'abord donner un aperçu des différents processus par lesquelles le quantum d'action permet de produire les couleurs de la nature, c.-à-d. les interactions entre les quantons de matière et les photons. Ensuite, nous exploreront le plus simple de ces systèmes: nous montrerons comment le quantum d'action conduit aux différentes couleurs produites par les atomes d'hydrogène. Après cela, nous découvrirons que l'interaction entre la matière et le rayonnement conduit à d'autres effets surprenants, tout particulièrement lorsque l'on prend en compte la relativité.

Les origines de la couleur

La théorie quantique explique toutes les couleurs de la nature. En effet, toutes les couleurs que nous observons sont dues aux particules *chargées* électriquement. Plus précisément, les couleurs sont dues aux interactions des particules chargées avec les photons. Toutes les couleurs sont donc des effets quantiques.

Jusque-là, nous avons exploré le mouvement des quantons en les décrivant uniquement par leur masse. Maintenant, nous allons étudier le mouvement des particules qui sont électriquement chargées. Les particules chargées responsables de la plupart des couleurs sont les électrons et les noyaux, ainsi que leurs composites, depuis les ions, les atomes et les molécules, jusqu'aux fluides et aux solides. De nombreuses questions concernant les couleurs font toujours l'objet de recherches. Par exemple, jusqu'à récemment, les raisons exactes pour lesquelles l'asphalte est noir n'étaient pas clairement expliquées. La structure exacte des composés chimiques, les *asphaltènes* qui produisent la couleur d'un marron très foncé, était inconnue. Seules des recherches récentes ont permis de régler la question. En fait, le développement de nouveaux colorants et de nouveaux effets de couleur constitue une part importante de l'industrie moderne.

Ref. 130

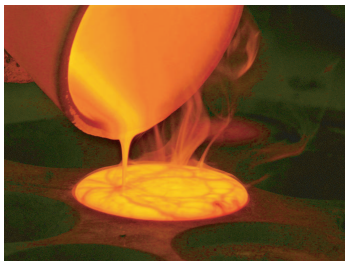
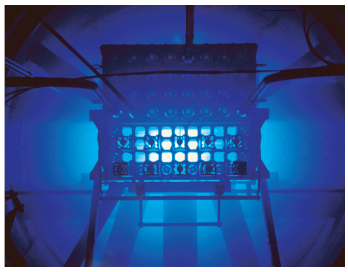
** «Possède ton sujet et les mots suivront.» Marcus Porcius Cato (234 – 149 av. J.-C.), dit Caton l'Ancien, était un homme politique romain, célèbre pour ces discours et son intégrité.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 129
Défi 142 e

Un aperçu des mécanismes spécifiques qui génèrent la couleur est donné dans le tableau suivant. Le tableau comprend toutes les couleurs qui apparaissent dans la vie de tous les jours. (Pouvez-vous en trouver une qui manque?)

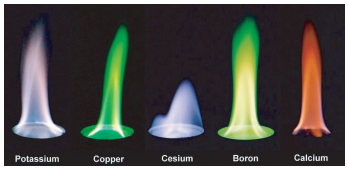
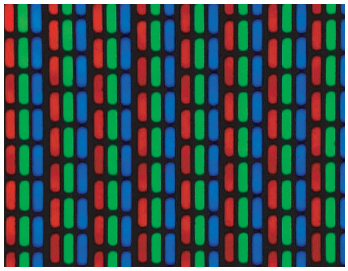
TABLEAU 7 Les origines des couleurs

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
Classe I: Couleurs dues à des excitations simples		
	1. Incandescence et rayonnement de charges libres	
	Lampe à arc au carbone, acier chaud, filament d'une ampoule, la plupart des étoiles, magma, lave, fusions à chaud	Les couleurs sont dues au spectre continu émis par toutes les matières chaudes; la séquence des couleurs, donnée par la loi de Wien, est: noir, rouge, orange, jaune, blanc, bleu-blanc (plomb et argent fondus © Graela)
	Feu de bois, bougie	Les flammes du bois et de la cire sont jaunes à cause d'une incandescence riche en carbone et pauvre en oxygène
	Feux d'artifice blanc, lampe de poche, cierges magiques	Dues à la transformation des métaux en oxyde par combustion à haute température, tel que le magnésium, le zinc, le fer, l'aluminium ou le zirconium (cierge magique © Sarah Domingos)
	Réacteurs nucléaires, sources de lumière synchrotron, lasers à électrons libres	Dues à des charges libres rapides: le rayonnement Vavilov–Čerenkov est dû à des particules plus rapides que la lumière dans la matière, le rayonnement de freinage* est dû au ralentissement des particules chargées (cœur d'un réacteur nucléaire au fond d'une piscine, aimablement fournie par la NASA)
	2. Excitations des gaz atomiques	

* La littérature anglaise utilise le terme allemand «bremsstrahlung» que l'on trouve également dans certains textes français [N.d.T.].

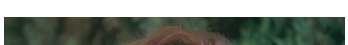
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Lampe à néon rouge, lampe à argon bleue, lampe à mercure UV, lampes de ville à sodium jaune, la plupart des lasers à gaz, lasers à vapeur métallique, certaines fluorescences	Les couleurs sont dues à des transitions entre les niveaux d'énergie atomiques (lampes à décharge de gaz © Pslawinski)
	Aurore polaire, triboluminescence dans les rubans adhésifs, cristalloluminescence dans le bromate de strontium	Dans l'air, les couleurs bleue et rouge sont dues aux niveaux d'énergie atomiques et moléculaires de l'azote, alors que les couleurs verte, jaune et orange sont dues à l'oxygène (aurore polaire © Jan Curtis)
	Éclaire, arcs électriques, étincelles, feux d'artifice colorés, la plupart des flammes colorées, certaines électroluminescences	La gamme de couleurs est due aux niveaux d'énergie d'atomes hautement excités (flammes de K, Cu, Cs, B, Ca © Philip Evans)
	3. Vibrations et rotations des molécules	
	Eau bleutée, glace bleue lorsqu'elle est claire, iode violet, brome rouge-marron, chlore jaune-vert, flammes rouges du CN ou flammes bleu-vert du CH, certains lasers à gaz, ozone bleue conduisant au ciel bleu et gris du soir	Les couleurs sont dues aux niveaux quantifiés de rotation et de vibration dans les molécules (iceberg bleu © Marc Shandro)
Classe II: Couleurs dues aux effets du champ de ligands		
	4. Composés de métaux de transition	
		

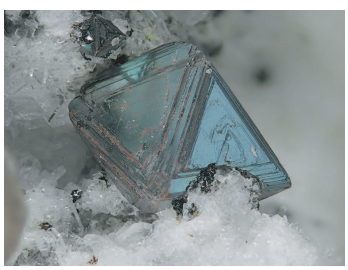
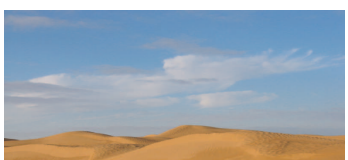
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Malachite $Cu_2CO_3(OH)_2$ verte, oxyde de cobalt bleu, azurite $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ bleue, hématite Fe_2O_3 rouge à marron, *MnO* vert, $Mn(OH)_2$ blanc, manganite marron, oxyde de chrome Cr_2O_3 vert, praséodyme vert, europium rose et les composés de samarium jaunes, $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ UV par effet piézochromique et thermochromique et phosphores électroniques, scintillation, certaines fluorescences, certains lasers	Les couleurs sont dues aux états électroniques des ions; les phosphores sont utilisés dans les tubes cathodiques pour les écrans de télévision et d'ordinateurs ainsi que dans les tubes des lampes fluorescentes (malachite verte sur de la kasolite jaune, un minéral uranifère trouvé à Kolwezi, RDC, largeur de l'image: 5 mm © Stephan Wolfsried; photo d'un masque de télévision © Planemad)
	5. Impuretés de métaux de transition	
	Rubis, émeraude, alexandrite, pérovskites, lasers correspondants	Les états électroniques des ions des métaux de transition sont excités par la lumière et absorbent donc des longueurs d'onde spécifiques (un rubis sur de la calcite provenant de Mogok, Birmanie, largeur de l'image: 3 cm © Rob Lavinsky)
Class III: Couleurs dues aux orbitales moléculaires		
	6. Composés organiques	
		

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Hémoglobine rouge du sang, hémocyanine bleue du sang, chlorophylle verte des plantes, carotènes jaunes ou oranges des carottes, fleurs et feuilles d'automne jaunes, anthocyanes rouges ou pourpres des baies, fleurs et feuilles d'automne rouges, indigo bleu, lycopène rouge des tomates, myoglobine contenant du fer dans la viande rouge, glucosamine marron dans la croute des aliments cuits au four, tannins marron, eumélanine noire dans la peau, les cheveux et les yeux humains, variété de phéomélanine riche en fer chez les rouquins, mélanine noire également dans les pommes et les bananes coupées ainsi que dans les sacs mobiles des caméléons, asphalte marron-noir, certaines fluorescences, chimiluminescence, phosphorescence, halochromisme, électrochromisme et thermochromisme, lasers à colorants	Les couleurs sont dues aux conjugaisons de liaisons π, c.-à-d. aux alternances de liaisons simples et doubles dans les molécules; les pigments floraux sont presque tous des anthocyanes, des bétalaïnes ou des carotènes; utilisés dans les colorants alimentaires et cosmétiques, dans les teintures textiles, dans les écrans électrochromes, dans les encres pour imprimantes couleurs, dans les photosensibilisateurs (narcisse © Thomas Lüthi; sang sur un doigt © Ian Humes; baies © Nathan Wall; cheveux, aimablement fournie par dusdin)
	Vers luisants, certaines bactéries et certains champignons, la plupart des poissons des eaux profondes, pieuvres, méduses, et autres animaux des eaux profondes	La bioluminescence est due à des molécules excitées, que l'on appelle généralement des *luciférines* (poisson-pêcheur, longueur: 4, 5 cm © Steve Haddock)
	**7. Transfert de charges inorganique**	
		

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Saphir bleu, lapis-lazuli bleu, amazonite verte, magnétite Fe_3O_4 marron-noir et la plupart des autres minéraux ferreux (colorant le basalte noir, les bouteilles de bière marron, le sable de quartz jaune, et bien d'autres roches aux tons marrons ou rouges), graphite noir, permanganate pourpre, bichromate de potassium orange, molybdates jaunes, hématite Fe_2O_3 rouge, certaines fluorescences	La lumière provoque le changement de position d'un électron d'un atome à un autre; par exemple, dans le saphir bleu la transition se fait entre les impuretés Ti et Fe; de nombreux pigments de peinture utilisent des couleurs des transferts de charges; les réactifs analytiques fluorescents sont utilisés en médecine et en biologie moléculaire (magnétite trouvée à Laach, Allemagne, largeur de l'image 10 mm © Stephan Wolfsried; désert de sable Evelien Willemsen)
Classe IV: Couleurs dues aux effets de bande d'énergie		
	8. Les bandes métalliques	
	Or (vert en transmission), pyrite, fer, laiton, alliages, argent, cuivre, rubis doré	Les couleurs par réflexion et par transmission sont dues à des transitions d'électrons entre bandes qui se chevauchent (saxophone © Selmer)
	9. Bandes dans les semi-conducteurs purs	
	Silicium, GaAs, galène PbS noire, cinabre HgS rouge, cadmium CdS jaune, CdSe noir, CdS_xSe_{1-x} rouge, ZnO blanc, HgS orange-vermillon, diamant incolore, SmS piézochromique noir à or	Les couleurs sont dues à des transitions d'électrons entre des bandes séparées; la série de couleurs est: noir, rouge, orange, jaune, blanc/incolore; certaines sont utilisés comme pigments (oxyde de zinc, aimablement fournie par Walkerma)
	10. Bandes dans les semi-conducteurs dopés	

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

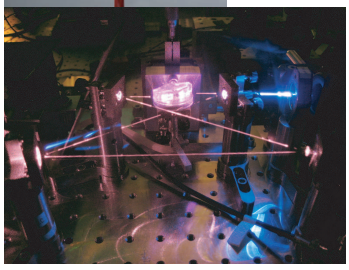
TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Diamant bleu, jaune, vert et noir; LEDs; lasers à semi-conducteurs; cellules photovoltaïques; phosphores à base de ZnS et $Zn_xCd_{1-x}S$ et autres phosphores	Les couleurs sont dues aux transitions entre les bandes des dopants et du semi-conducteur (ex: diamant bleu: accepteurs de bore, diamant noir: donneurs d'azote) (points quantiques © Andrey Rogach)
	11. Centres de couleur	
	Améthyste, quartz fumé, fluorite, diamants verts, topaze bleue, jaune et marron, sel brun, couleur pourpre du verre irradié contenant du Mn^{2+}, lyoluminescence, certaines fluorescences, lasers à centre F	Les couleurs sont dues aux centres de couleur, c.-à-d. aux électrons ou aux trous liés aux lacunes cristallines; les centres de couleur sont généralement créés par rayonnement (améthyste © Rob Lavinsky)
	Certaines lunettes de soleil dont la teinte varie avec la lumière	La coloration photochromique est due aux centres de couleur formés par la lumière UV du Soleil
Classe V: Couleurs dues à l'optique physique et géométrique		
	12. Réfraction dispersive et polarisation	
	Diamant taillé, zircone taillée, halos et chiens du soleil* formés par des cristaux de glace dans l'air	La décomposition spectrale (étincelle ou «feu» des pierres précieuses) est due à la dispersion dans les cristaux (zircone © Gregory Phillips)
	Arc-en-ciel	Les couleurs de l'arc primaire et secondaire sont dues à la dispersion dans les gouttelettes d'eau
	Rayons verts	La dispersion dans l'atmosphère décale les couleurs du soleil
	13. Diffusion	

* Phénomène météorologique dont le nom scientifique est «parhélies» et que l'on nomme également «faux soleil», «soleil double» ou «œil de bouc» [N.d.T.].

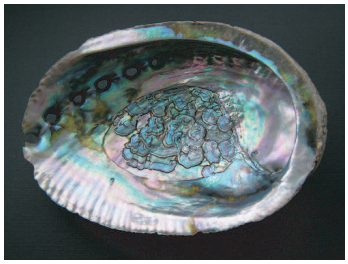
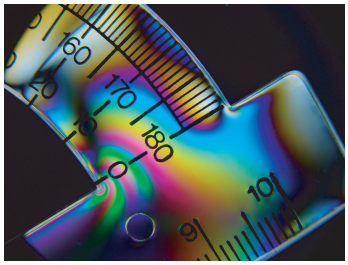
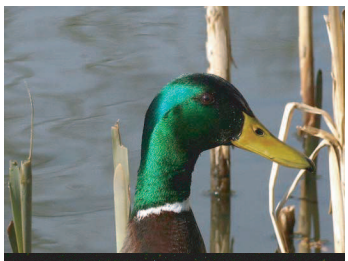
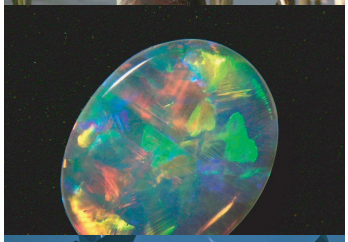
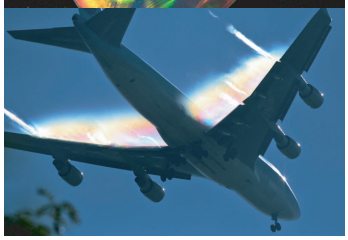
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Ciel bleu, coloration bleutée des montagnes lointaines, coucher de soleil rouge; intensification des couleurs par la pollution; quartz bleu	La lumière bleue est plus diffusée que la lumière rouge par diffusion de Rayleigh lorsque les diffuseurs (molécules, poussières) sont plus petits que la longueur d'onde de la lumière (coucher de soleil sur Tokyo © Altus Plunkett; quartz bleu © David Lynch)
	Couleur des cheveux blancs, lait, mousse de bière, nuages, brouillard, fumée de cigarette sortant des poumons, neige, crème fouettée, shampoing, étoiles dans les pierres précieuses	La couleur blanche est due à la diffusion de Mie indépendante de la longueur d'onde, c.-à-d. la diffusion par des particules plus grandes que la longueur d'onde de la lumière (bonhomme de neige © Andreas Kostner)
	Couleur bleue de la peau humaine par temps froid, yeux bleus et verts chez l'homme, peau de singe bleu, cou de dinde bleu, la plupart des poissons bleus, reptiles bleus, fumée de cigarette bleue	Les couleurs bleu Tyndall sont dues à la diffusion par des petites particules devant un fond sombre (grenouille venimeuse bleue, *Dendrobates azureus* © Lee Hancock)
	Rubis doré	La couleur rouge du verre de Murano est due à la diffusion par de minuscules particules d'or colloïdales incrustées dans le verre en combinaison avec la structure des bandes métalliques de l'or (rubis doré © murano-glass-shop.it)
	Non-linéarités, effet Raman, dihydrogénophosphate de potassium (KDP)	La diffusion par décalage de fréquence, la génération de deuxième harmonique ainsi que d'autres non-linéarités de certains matériaux modifient la couleur de la lumière incidente aux intensités élevées (gyrolaser doubleur de fréquence de 800 nm à 400 nm © Jeff Sherman)

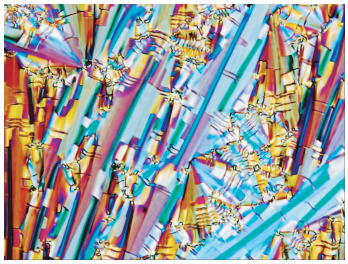
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	**14. Interférences (sans diffraction)**	
	Nacre, films d'huile, bulles de savon, revêtements des lentilles de caméra, œil du chat dans le noir, ailes de mouches et de libellules, écailles de poisson, certains serpents, perles, couleurs de l'acier trempé	L'interférence par des couches minces produit une séquence de couleurs standard qui permet une détermination précise de l'épaisseur (coquille d'ormeau © Anne Elliot)
	Couleurs de polarisation de fines couches de cristaux biréfringents ou de couches plus épaisses de polymères contrains	Les couleurs sont dues aux interférences, comme le montre la dépendance avec l'épaisseur de la couche (photoélasticité, aimablement fournie par Nevit Dilmen)
	Arcs-en-ciel surnuméraires (voir page 102 du volume III)	Dû aux interférences, comme le montre la dépendance avec la taille des gouttes
	Scarabées irisés, papillons et plumes d'oiseaux, couleurs irisées sur les billets de banque et sur les voitures	Dû à la diffusion par des petites structures ou par des nanoparticules, comme le montre la dépendance de la couleur avec l'angle (canard colvert © Simon Griffith)
	15. Diffraction (avec interférences)	
	Opale	Les couleurs sont dues aux minuscules sphères incluses dans l'eau à l'intérieur de l'opale; les couleurs peuvent changer lorsque l'opale sèche (opale brésilienne polie © Opalsnopals)
	Halo, gloire, couronne	Les couleurs sont dues à la diffraction par des gouttelettes de brume minuscules (irisation du nuage de condensation d'un avion © Franz Kerschbaum)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Réseaux de diffraction, CDs, disques vinyles, certains scarabées et serpents	Les couleurs sont dues à la diffraction et aux interférences par de minuscules creux réguliers (CD éclairé par une lampe de poche © Alfons Reichert)
	Cristaux photoniques	Un sujet de la recherche moderne
	Cristaux liquides cholestériques, certains scarabées	Les couleurs sont dues à la diffraction et aux interférences dans les couches internes des matériaux (couleurs de cristaux liquides © Ingo Dierking)
Classe VI: Couleurs dues aux limitations de l'œil		
Couleurs de Fechner, telles que sur lite.bu.edu/vision/applets/Color/Benham/Benham.html	Disque ou toupie de Benham	Les couleurs sont dues à une réponse différente à la vitesse par les différents photorécepteurs
Production de couleur interne lorsque les yeux sont stimulés	Phosphènes	Produit par pression (frottement, éternuement) ou par des champs électriques ou magnétiques
Couleurs de polarisation	Pinceaux d'Haidinger	Voir page 113 du volume III
Illusions de couleur, telles que sur www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/color9e.html	Couleurs qui apparaissent et disparaissent	Les effets sont dus à des combinaisons de traitements cérébraux et de limitations oculaires
Fausse couleur produite par l'œil, comme décrit à la page 196 du volume III	De la lumière rouge peut être vue verte	Observable en optique adaptative, si de la lumière rouge est focalisée sur un cône sensible au vert
Personne daltonienne, voir page 209 du volume III, avec spectre de couleurs réduit	Protanopie, deutéranopie, tritanopie	Chaque type limite la perception des couleurs d'une manière différente

Les couleurs fascinent. La fascination permet toujours les bonnes affaires. En effet, une grande partie de l'industrie chimique est dédiée à la synthèse de colorants pour les

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

peintures, les encres, les vêtements, la nourriture et les produits cosmétiques. L'évolution utilise également la fascination des couleurs pour ses propres affaires, à savoir perpétuer la vie. Les spécialistes dans ce domaine sont les plantes florales. La chimie de la production des couleurs par les plantes est extrêmement complexe et au moins aussi intéressante que la production des couleurs par les usines. Pratiquement tous les colorants que l'on trouve dans les fleurs, depuis le blanc, le jaune, l'orange, le rouge jusqu'au bleu, appartiennent à trois classes chimiques: les *caroténoïdes*, les *anthocyanes* (flavonoïdes) et les *bétalaïnes*. Ces colorants sont stockés dans les pétales, à l'intérieur de compartiments dédiés, les *vacuoles*. Il existe de nombreux articles de revue de synthèse excellents four-
Ref. 131 nissant les détails.

Même si les couleurs sont courantes chez les plantes et les animaux, la plupart des animaux supérieurs ne produisent pas beaucoup de colorants eux-mêmes. Par exemple, le corps humain ne produit qu'un seul colorant: la *mélanine*. (L'*hémoglobine*, qui colore le sang en rouge, n'est pas un colorant dédié, mais transporte l'oxygène depuis les poumons vers l'ensemble du corps. De même, la *myoglobine* rose dans les muscles n'est pas un colorant dédié.) De nombreux animaux supérieurs, comme les oiseaux, doivent *manger* les colorants qui sont pourtant si caractéristiques de leur apparence. La couleur jaune des pattes des pigeons en est un exemple. Il a été démontré que le lien entre la couleur et la nutrition est régulièrement utilisé par les couples potentiels pour juger à partir des couleurs corporelles si un partenaire qui se présente est suffisamment sain et donc
Ref. 132 suffisamment attrayant.

Par-dessus tout, le tableau présenté ci-dessus distingue six grandes classes parmi les origines des couleurs. L'étude de la première classe, les couleurs de l'incandescence, avait conduit Max Planck à découvrir le quantum d'action. Depuis cette découverte, des recherches ont confirmé que dans chaque classe, toutes les couleurs étaient dues au quantum d'action $\hbar$. La relation entre le quantum d'action et les propriétés matérielles des atomes, des molécules, des liquides et des solides est tellement bien comprise que les colorants peuvent désormais être conçu à l'aide d'ordinateurs.

En résumé, une exploration des origines des couleurs que l'on trouve dans la nature confirme que toutes les couleurs sont dues à des effets quantiques. Nous le montrons en explorant l'exemple le plus simple: les couleurs des excitations des gaz atomiques.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

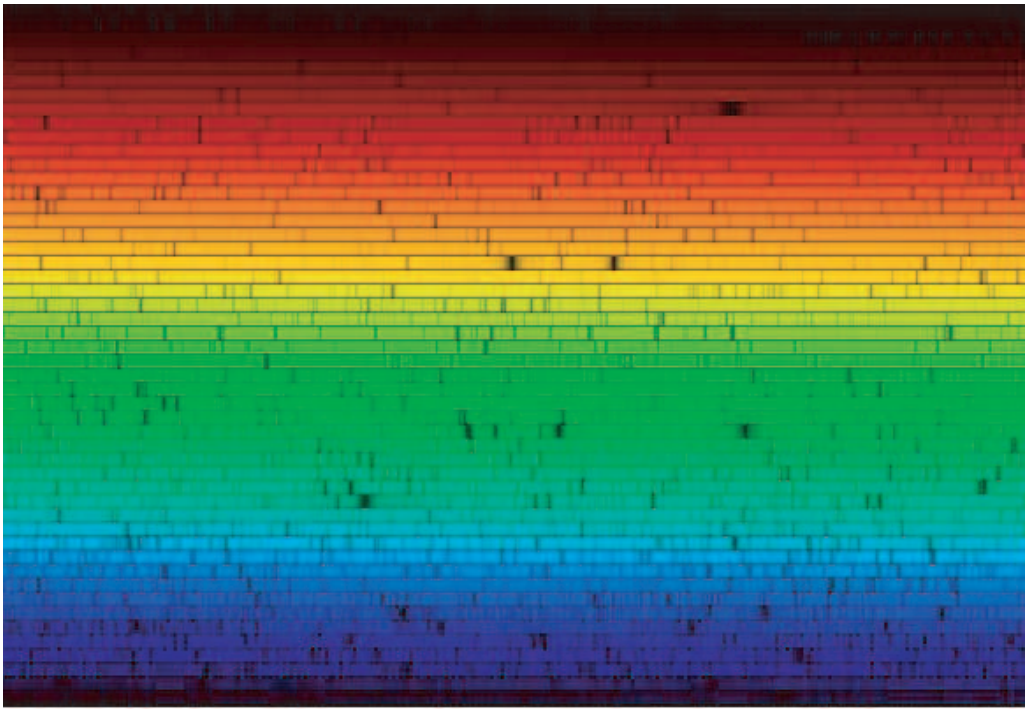


FIGURE 77 Le spectre de la lumière du jour: une image composée par empilement d'un arc-en-ciel étendu, montrant ses raies de Fraunhofer (© Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA, NSF).

DÉTERMINER LA COMPOSITION DES ÉTOILES EN UTILISANT L'ARC-EN-CIEL

Vers le début du XVIIIe siècle, le fabriquant d'instruments bavarois Joseph Fraunhofer* et le physicien anglais William Wollaston avaient noté qu'il *manquait* certaines couleurs à l'arc-en-ciel. Ces couleurs apparaissent comme des raies noires lorsque l'arc-en-ciel est étalé sur une largeur suffisante. La Figure 77 montre les raies en détail. De nos jours on les appelle les *raies de Fraunhofer*. En 1860, Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen ont montré que les couleurs *manquantes* dans l'arc-en-ciel étaient exactement celles que certains éléments *émettaient* lorsqu'on les chauffait. De cette façon, ils ont réussi à montrer que le sodium, le calcium, le baryum, le nickel, le magnésium, le zinc, le cuivre et le fer étaient présents dans le Soleil. Regarder l'arc-en-ciel nous permet de déterminer la composition

* Joseph Fraunhofer (Straubing, 1787 – Munich, 1826) étant devenu orphelin à l'âge de 11 ans, apprit le polissage des lentilles. Il étudia l'optique par lui-même à partir de livres. Il entra dans une entreprise d'optique à l'âge de 19 ans, assurant le succès de son activité en produisant les meilleurs lentilles, télescopes, micromètres, réseaux optiques et systèmes optiques disponibles en son temps. Il inventa le spectroscope et l'héliomètre. Il découvrit et compta 476 raies dans le spectre du Soleil; ces raies portent désormais son nom. (Aujourd'hui, les raies de Fraunhofer sont encore utilisées comme étalons de mesure: la seconde et le mètre sont définis à partir d'elles.) Des physiciens du monde entier venaient acheter les instruments qu'il fabriquait, lui rendaient visite et lui demandaient des exemplaires de ses publications. Même après sa mort, ses instruments sont restés inégalés pendant des générations. Avec les télescopes de Fraunhofer, Bessel réussit en 1837 à effectuer la première mesure de la parallaxe d'une étoile, et en 1846 Johann Gottfried Galle découvrit Neptune. Fraunhofer devint professeur en 1819. Il mourut jeune, des conséquences des années passées à travailler en présence de plomb et de poudre de verre.

Vol. II, page 312

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

du Soleil.

Parmi les 476 raies de Fraunhofer que Kirchhoff et Bunsen avaient observé, 13 ne correspondaient à aucun élément connu. En 1868, Jules Janssen et Joseph Lockyer prédirent indépendamment que ces raies inconnues devaient provenir d'un élément inconnu. Cet élément fut finalement trouvé sur Terre en 1895, dans un minerai uranifère que l'on appelle la clévéite. Le nouvel élément fut appelé *hélium*, du mot grec ἥλιος «helios» qui signifie Soleil.

En 1925, en utilisant une équation développée par Saha et Langmuir, la jeune physicienne Cecilia Payne (Wendover, Angleterre, 1900 – Cambridge, Massachusetts, 1979) montra au monde comment déduire le pourcentage de masse de chaque élément à partir du spectre lumineux d'une étoile. Elle le fit au cours de sa brillante thèse doctorale. Pardessus tout, elle montra que l'hydrogène et l'hélium étaient les deux éléments les plus abondants dans le Soleil, dans les étoiles, et donc dans tout l'Univers. Cela allait complètement à l'encontre des idées de l'époque, mais de nos jours, ce fait est de notoriété publique. Payne avait terminé ses études de physique à Cambridge, au Royaume-Uni, mais n'y avait pas obtenu de diplôme parce qu'elle était une femme. Elle partit donc pour les États-Unis, où la situation était quelque peu meilleure, et où elle prépara sa thèse doctorale. Finalement, elle devint professeur à l'Université Harvard, puis, plus tard, chef du département d'astronomie. Avant tout, Payne est devenue un modèle important pour de nombreuses femmes scientifiques.

Bien qu'il soit le deuxième élément le plus abondant dans l'univers, l'hélium est rare sur Terre car c'est un gaz noble léger qui ne forme pas de composés chimiques. Sur Terre, les atomes d'hélium montent dans l'atmosphère et finissent par s'échapper dans l'espace.

Comprendre les raies de couleur produites par chaque élément était déjà devenu intéressant bien avant la découverte de l'hélium. Mais par la suite, l'intérêt s'est accru grâce au nombre grandissant d'applications utilisant les connaissances sur les couleurs, en chimie, en physique, en technologie, en cristallographie, en biologie et dans le domaine des lasers. Les couleurs ont une grande importance sur le plan économique, comme le montrent l'industrie de la mode, les médias et le monde de la publicité.

Vol. III, page 125

En résumé, les couleurs sont des mélanges spécifiques de fréquences lumineuses. La lumière est une onde électromagnétique et est émise par des charges en mouvement. Pour le physicien, les couleurs résultent donc de l'interaction de la matière chargée avec le champ électromagnétique. Or, ces raies de couleur *nettes* ne peuvent pas être expliquées par l'électrodynamique classique. Nous avons besoin de la théorie quantique pour le faire.

Qu'est-ce qui détermine les couleurs des atomes?

Les couleurs les plus simples que l'on peut étudier sont les raies de couleurs bien nettes qui sont émises ou absorbées par des atomes individuels. On trouve de tels atomes individuels dans les gaz. L'atome le plus simple à étudier est celui de l'hydrogène. Comme le montre la Figure 78, un gaz d'hydrogène chaud émet de la lumière. La lumière consiste en une poignée de raies spectrales bien nettes que l'on peut voir sur la partie gauche de la Figure 79. Dès 1885, l'instituteur suisse Johann Balmer (1828 – 1898) avait découvert

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

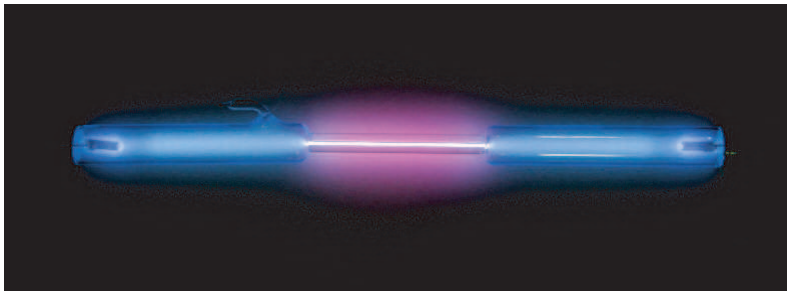


FIGURE 78 Décharge d'hydrogène à basse pression dans un tube de verre de 20 cm de long (© Jürgen Bauer sur www.smart-elements.com).

que les longueurs d'onde des raies visibles de l'hydrogène obéissaient à la formule:

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right) \quad \text{pour} \quad m = 3, 4, 5, \ldots . \tag{91}$$

Des mesures minutieuses, comprenant celles des raies spectrales de l'hydrogène dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet, ont permis à Johannes Rydberg (1854 – 1919) de généraliser cette formule en:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) , \tag{92}$$

où n et $m > n$ sont des entiers positifs et où la constante R, dite *constante de Rydberg*, a la valeur $10,97\,\mu m^{-1}$ (plus facile à mémoriser, la valeur inverse est $1/R = 91,16\,nm$). Toutes les raies de couleurs émises par l'hydrogène satisfont à cette formule simple. La physique classique ne peut pas du tout expliquer ce résultat. La théorie quantique a donc un défi clairement déterminé: expliquer la formule et la valeur de R.

Accessoirement, la transition λ_{21} de l'hydrogène s'appelle la *raie de Lyman-alpha*. Sa longueur d'onde, 121, 6 nm, se situe dans l'ultra-violet. Elle peut facilement s'observer à l'aide de télescopes, car la plupart des étoiles visibles sont constituées d'hydrogène excité. La raie de Lyman-alpha est couramment utilisée pour déterminer la vitesse des étoiles ou des galaxies lointaines, car l'*effet Doppler* modifie la longueur d'onde lorsque la vitesse est importante. Le record, datant de 2004, est une galaxie dont la raie de Lyman-alpha était décalée à 1337 nm. Pouvez-vous calculer la vitesse à laquelle elle s'éloigne de la Terre?

Ref. 133

Défi 143 e

Depuis le début, il était clair que les couleurs de l'hydrogène étaient dues au mouvement de ses électrons. (Pourquoi?) La première façon de déduire la formule de Balmer à partir du quantum d'action a été trouvée par Niels Bohr en 1903. Bohr avait compris que contrairement aux planètes qui tournent autour du Soleil, l'électron se déplaçant autour du proton n'avait qu'un nombre discret d'états de mouvements possibles: le moment cinétique de l'électron est quantifié. Si on suppose que le moment cinétique de l'électron est un multiple entier de $\hbar$ on obtient directement la formule de Balmer et il est possible d'expliquer la valeur numérique de la constante de Rydberg R. Ce calcul est tellement célèbre qu'il se trouve dans de nombreux manuels de l'enseignement secondaire. Le résultat avait également renforcé la décision de Bohr de consacrer sa vie à l'exploration de la structure de l'atome.

Défi 144 f

Page 91

Défi 145 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

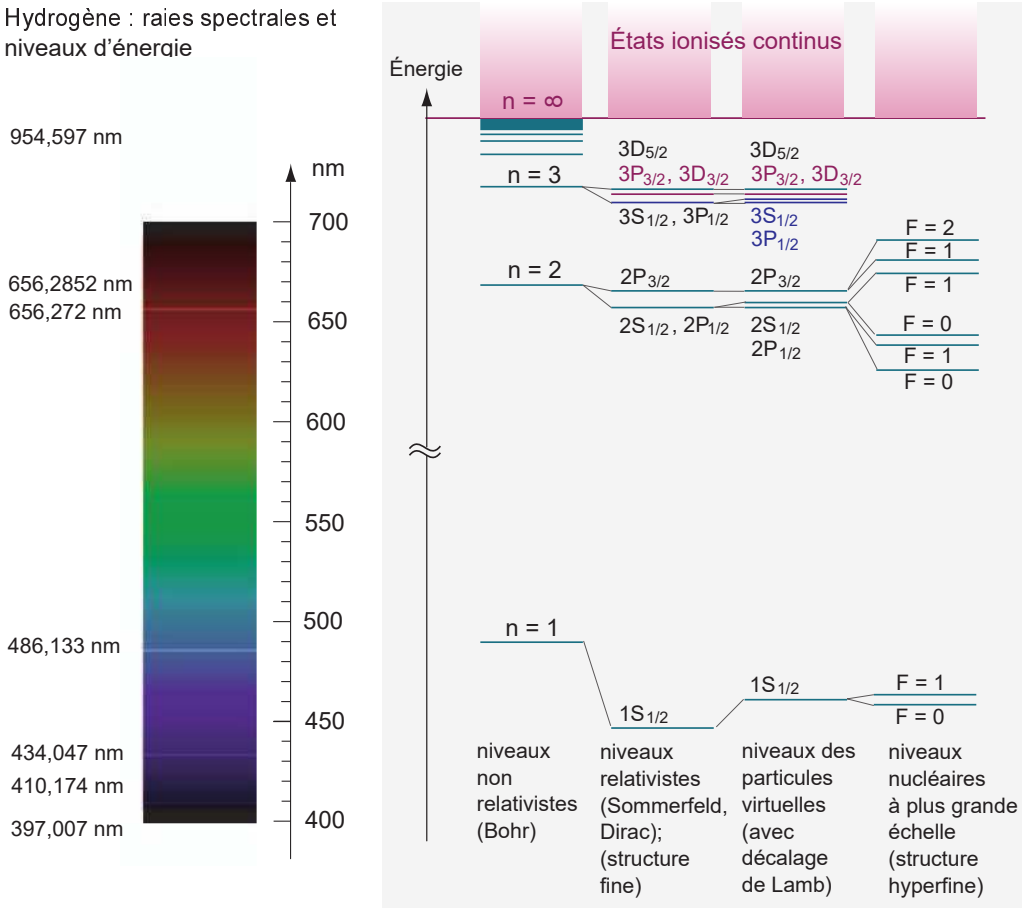


FIGURE 79 L'hydrogène atomique: le spectre visible de l'hydrogène (NASA) et ses niveaux d'énergie calculés en utilisant quatre approximations de plus en plus précises. Pouvez-vous associer les raies visibles avec les niveaux de transition auquel elles correspondent?

Vingt ans plus tard, en 1926, Erwin Schrödinger résolvait sont équation du mouvement pour un électron se déplaçant dans le potentiel électrostatique $V(r) = e^2/4\pi\varepsilon_0 r$ produit par un proton considéré comme ponctuel. Ce faisant, Schrödinger reproduisait les résultats de Bohr, déduisait la formule de Balmer et devint célèbre dans le monde de la physique. Cependant, ce calcul important est long et compliqué. On peut le simplifier.

Pour comprendre les couleurs de l'hydrogène, il n'est pas nécessaire de résoudre une équation du mouvement pour l'électron. Il suffit de comparer les énergies de l'état initial et de l'état final de l'électron. Ceci peut se faire le plus simplement possible en remarquant qu'une forme spécifique de l'action doit être un multiple de $\hbar/2$. Cette approche, qui est une généralisation de l'explication de Bohr, a été développée par Einstein, Brillouin et Keller, et s'appelle aujourd'hui la quantification EBK. Elle s'appuie sur le fait
Ref. 134 que l'action S de tout système quantique obéi à

$$S = \frac{1}{2\pi}\oint \mathrm{d}q_i p_i = \left(n_i + \frac{\mu_i}{4}\right)\hbar \qquad (93)$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pour chaque coordonnée q_i et sa quantité de mouvement conjuguée p_i. L'expression reflète la similarité entre le moment cinétique et l'action. Ici, n_i peut être zéro ou n'importe quel entier positif, et μ_i est l'*indice de Maslov*, un entier pair qui, dans le cas des atomes, a la valeur 2 pour la coordonnée radiale r et la coordonnée azimutale θ, et la valeur 0 pour l'angle de rotation φ. L'intégrale est prise sur une orbite complète. Plus simplement, *l'action S est un multiple demi-entier du quantum d'action*. Ce résultat peut s'utiliser pour calculer les niveaux d'énergie des systèmes quantiques périodiques. Faisons ce calcul dans le cas de l'atome d'hydrogène.

Tout mouvement de rotation dans un potentiel sphérique $V(r)$ est caractérisé par une énergie constante E et des moments cinétiques constant L et L_z. Donc, les variables quan-
Défi 146 pe tité de mouvement conjuguées* des coordonnées r, θ et φ sont:

$$\begin{aligned} p_r &= \sqrt{2m(E - V(r)) - \frac{L^2}{r^2}} \\ p_\theta &= \sqrt{L^2 - \frac{L_z^2}{\sin^2\theta}} \\ p_\varphi &= L_z \,. \end{aligned} \tag{94}$$

En utilisant ces expressions dans l'équation (93) et en posant $n = n_r + n_\theta + n_\varphi + 1$, on obtient** le résultat

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^2} = -\frac{Rhc}{n^2} = -\frac{c^2 m\alpha^2}{2n^2} \approx -\frac{2,19\,\mathrm{aJ}}{n^2} \approx -\frac{13,6\,\mathrm{eV}}{n^2} \,. \tag{97}$$

Ces *niveaux d'énergie* E_n (les niveaux de Bohr non relativistes) sont représentés sur la Figure 79. En utilisant l'idée qu'un atome d'hydrogène n'émet qu'un seul photon lorsque son électron passe d'un état E_n à un état E_m, nous obtenons exactement la formule
Défi 148 f qu'avaient déduite Balmer et Rydberg à partir des observations! La concordance entre l'observation et le calcul est d'environ quatre chiffres significatifs. Pour la première fois (ou presque), une propriété de la matière (la couleur de l'atome d'hydrogène) avait été expliquée à partir d'un principe fondamental de la nature. Le quantum d'action $\hbar$ était un élément clef pour cette explication. (Toute la discussion suppose que les électrons au

* Les variables quantité de mouvement conjuguées sont également appelées «moments conjugués» ou «impulsions conjuguées» [N.d.T.].

** Le calcul est assez simple. Après avoir inséré $V(r) = e/4\pi\varepsilon_0 r$ dans l'équation (94), il faut effectuer
Défi 147 pe l'intégration (un peu compliquée). En utilisant le résultat général

$$\frac{1}{2\pi}\oint \frac{\mathrm{d}z}{z}\sqrt{Az^2 + 2Bz - C} = -\sqrt{C} + \frac{B}{\sqrt{-A}} \tag{95}$$

on obtient:

$$\left(n_r + \frac{1}{2}\right)\hbar + L = n\hbar = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{m}{-2E}} \,. \tag{96}$$

Ceci nous conduit à la formule (97) pour l'énergie.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sein des atomes d'hydrogène qui émettent la lumière sont dans des états propres. Pouvez-
Défi 149 e vous expliquer pourquoi c'est le cas?)

En bref, le quantum d'action implique que seules certaines valeurs spécifiques de l'énergies sont permises pour un électron dans un atome. Le niveau d'énergie le plus bas, pour $n = 1$, est appelé l'*état fondamental*. La valeur de l'énergie correspondante, 2, 19 aJ, est l'*énergie d'ionisation* de l'hydrogène. Si cette énergie est ajoutée à celle de l'état fondamental, l'électron n'est plus lié au noyau. L'énergie d'ionisation joue donc le même rôle pour les électrons autour des atomes que la *vitesse de libération* (ou plutôt l'*énergie* de libération) joue pour les satellites ou les fusées qui veulent s'extraire de l'attraction des planètes.

De la même façon que le quantum d'action détermine les couleurs de l'atome d'hydrogène, il détermine les couleurs de tous les autres atomes. Toutes les raies de
Page 205 Fraunhofer, qu'elles soient observées dans l'infrarouge, le visible ou l'ultraviolet, sont dues au quantum d'action. En fait, toutes les couleurs dans la nature sont dues à des mélanges de raies de couleur, de sorte que toutes les couleurs, même celles des solides et des liquides, sont déterminées par le quantum d'action.

La forme des atomes

Les atomes libres sont sphériques. Les atomes placés dans des champs externes se déforment. Mais quelle que soit la situation, la forme des atomes est due à la forme de leur fonction d'onde. Le cas le plus simple est celui de l'atome d'hydrogène. Ses fonctions d'onde (plus précisément les fonctions propres de quelques-uns de ses premiers niveaux d'énergie) sont illustrées sur la partie droite de la Figure 81. Ces fonctions avaient déjà été calculées par Erwin Schrödinger en 1926 et on les trouve dans tous les manuels. Dans ce texte, nous montrons simplement les résultats sans faire les calculs.

Le carré de la fonction d'onde est la densité de probabilité de l'électron. Cette densité diminue rapidement lorsque la distance au noyau augmente. Comme dans le cas d'un nuage réel, la densité ne s'annule jamais, même aux grandes distances. On pourrait donc prétendre que tous les atomes ont une taille infinie, mais en pratique, les liaisons chimiques ou l'arrangement des atomes dans les solides montrent qu'il est beaucoup plus approprié d'imaginer les atomes comme des nuages de taille finie.

Cela peut paraître surprenant, mais la première expérience ayant permis de mesurer la fonction d'onde d'un atome ne date que de 2013. Elle a été réalisée à l'aide d'une
Ref. 138 technique astucieuse de photoionisation par Aneta Stodolna et son équipe. Leur résultat expérimental superbe est illustré sur la Figure 80. Les figures confirment que les fonctions d'onde, contrairement aux densités de probabilité, ont des nœuds, c.-à-d. des lignes (ou plutôt des surfaces) le long desquelles leur valeur est nulle.

En résumé, toutes les expériences confirment que l'électron au sein de l'atome d'hydrogène forme des fonctions d'onde exactement de la manière prédite par la théorie quantique. En particulier, la forme des atomes est en accord avec le calcul de la mécanique quantique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

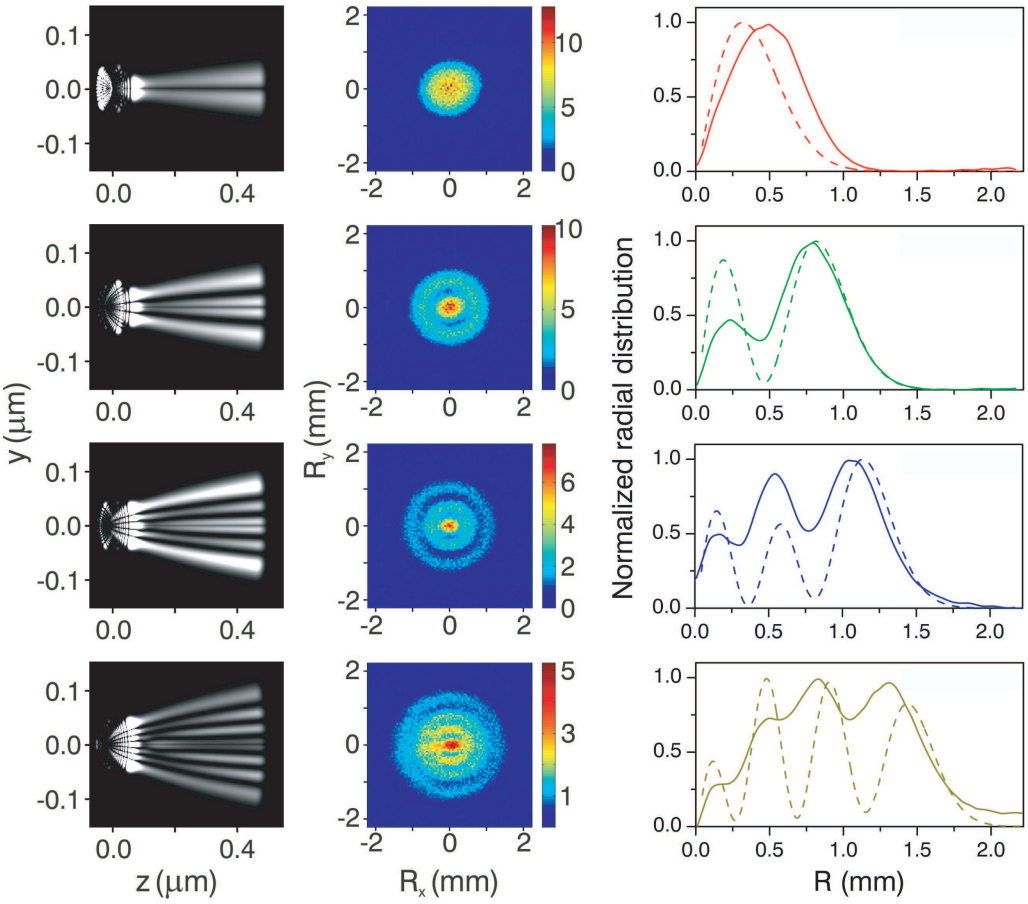


FIGURE 80 La figure montre la structure nodale calculée et mesurée de l'atome d'hydrogène placé dans un champ électrique externe faible, amplifié par une lentille électrostatique. Les motifs sont les ombres d'interférences bidimensionnelles des fonctions d'onde. Colonne de gauche: comment la fonction d'onde se projette depuis les atomes vers l'écran macroscopique; colonne centrale: la structure nodale mesurée; colonne de droite: comparaison entre les densités électroniques mesurées (trait plein) et calculées (pointillés) (© Aneta Stodolna/APS, reproduit de Ref. 138).

La taille des atomes

Le calcul des niveaux d'énergie de l'hydrogène permet également de déterminer le rayon effectif des orbites de l'électron. Il est donné par

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} = n^2 \frac{\hbar}{m_e c\alpha} = n^2 a_0 \approx n^2\, 52,918\,937\ \text{pm}\ , \text{ avec } n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (98)$$

Nous voyons à nouveau que la théorie quantique, contrairement à la physique classique, n'autorise que certaines orbites spécifiques autour du noyau. (Pour plus de détails sur la constante de structure fine α, voir ci-dessous.) Pour être plus précis, ces rayons sont les tailles moyennes des nuages électroniques entourant le noyau. La plus petite valeur du rayon orbital, 53 pm pour $n = 1$, est appelée le *rayon de Bohr* et est notée a_0.

Page 213, page 222

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

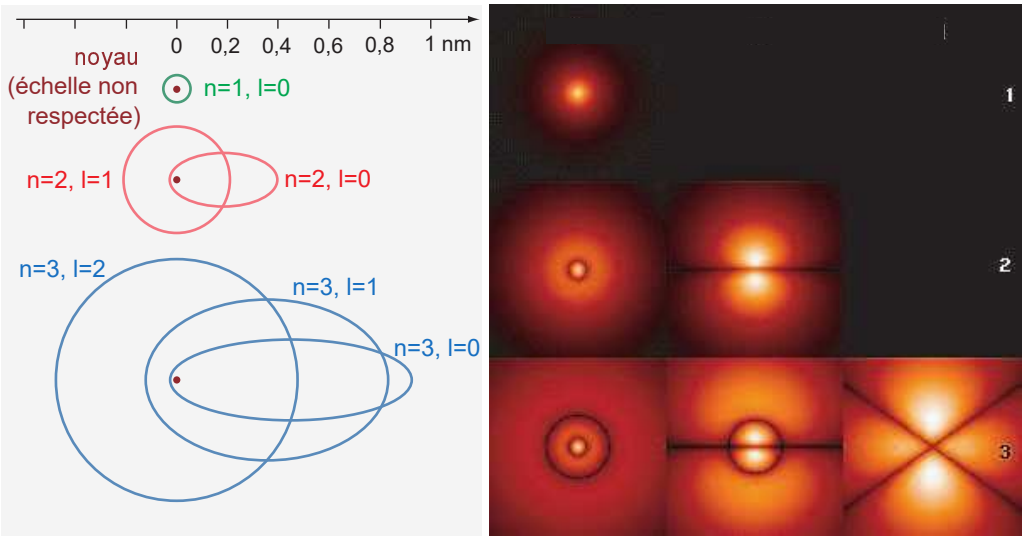


FIGURE 81 Les orbites électroniques imaginées (qui n'existent pas et sont donc fausses) du modèle de Bohr-Sommerfeld de l'atome d'hydrogène (à gauche) et la description correcte qui utilise la densité de probabilité de l'électron dans les différents états (à droite) (© Wikimedia)

Dans un gaz d'atomes d'hydrogène, la plupart des atomes sont dans l'état fondamental décrit par $r_1 = a_0$ et E_1. D'un autre côté, la théorie quantique implique qu'un atome d'hydrogène excité au niveau $n = 500$ a une taille d'environ 12 µm: plus gros que de nombreuses bactéries! De tels atomes démesurés, que l'on appelle généralement des *atomes de Rydberg*, ont en effet été observés en laboratoire, bien qu'ils soient extrêmement sensibles aux perturbations.

Ref. 135

En bref, le quantum d'action détermine *la taille des atomes*. Le résultat confirme donc la prédiction par Arthur Erich Haas de 1910. Autrement dit,

Page 23

▷ Le quantum d'action détermine la taille de toutes choses.

En 1915, Arnold Sommerfeld comprit que l'analogie du mouvement des électrons avec le mouvement gravitationnel orbital pouvait se prolonger de deux façons. Tout d'abord, les électrons peuvent se déplacer, en moyenne, sur des *ellipses* plutôt que sur des cercles. La quantification du moment cinétique implique alors que seules certaines excentricités sont possibles. Plus le moment cinétique est élevé, plus le nombre de possibilités est grand: les quelques premières sont représentées sur la Figure 81. L'excentricité la plus forte correspond à la valeur minimale $l = 0$ du nombre quantique dit azimutal, alors que les cas $l = n-1$ correspondent à des orbites circulaires. De plus, les ellipses peuvent avoir des orientations différentes dans l'espace.

Ref. 137

Le deuxième point relevé par Sommerfeld était que les vitesses de l'électron dans l'hydrogène étaient (quelque peu) relativistes: les valeurs de la vitesse ne sont pas négligeables par rapport à la vitesse de la lumière. En effet, la fréquence orbitale de l'électron

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

dans l'hydrogène est

$$f_n = \frac{1}{n^3}\frac{e^4 m_e}{4\varepsilon_0^2 h^3} = \frac{1}{n^3}\frac{m_e c^2 \alpha^2}{h} \approx \frac{6,7\,\mathrm{PHz}}{n^3} \tag{99}$$

et sa vitesse est

$$v_n = \frac{1}{n}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} = \frac{\alpha c}{n} \approx \frac{2,2\,\mathrm{Mm/s}}{n} \approx \frac{0,007\ c}{n}\,. \tag{100}$$

Comme on peut s'y attendre, plus l'orbite de l'électron est éloignée du noyau, plus il se déplace lentement. Ce résultat peut également être vérifié expérimentalement: en remplaçant l'électron par un muon, il est possible de mesurer la dilatation temporelle de sa durée de vie. Les mesures sont en excellent accord avec les calculs. Ref. 136

En bref, Sommerfeld avait remarqué que le calcul de Bohr ne prenait pas en compte les effets relativistes. Et en effet, des mesures de haute précision montrent de légères différences entre les niveaux d'énergie non relativistes de Bohr et ceux que l'on mesure. Le calcul doit être amélioré.

L'hydrogène relativiste

La mesure des niveaux d'énergie atomique est possible avec une précision beaucoup plus élevée que la mesure des fonctions d'onde. En particulier, les mesures de niveau d'énergie permettent d'observer des effets relativistes.

Dans le cas relativiste, l'action EBK doit également être un multiple de $\hbar/2$. À partir de l'expression relativiste de l'énergie cinétique de l'électron dans un atome d'hydrogène Ref. 134

$$E + c^2 m = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{101}$$

nous obtenons l'expression Défi 150 f

$$p_r^2 = 2mE\left(1 + \frac{E}{2c^2 m}\right) + \frac{2me^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 + \frac{E}{c^2 m}\right)\,. \tag{102}$$

Nous introduisons maintenant, par commodité, la *constante de structure fine*, définie par $\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c) = \sqrt{4\pi\hbar R/mc^3} \approx 1/137,036$ (α est une constante sans dimension; $R = 10,97\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ est la constante de Rydberg). L'action radiale EBK implique alors que Défi 151 f

$$E_{nl} + c^2 m = \frac{c^2 m}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\left(n - l - \frac{1}{2} + \sqrt{(l+\frac{1}{2})^2 - \alpha^2}\right)^2}}}\,. \tag{103}$$

Ce résultat, trouvé pour la première fois par Arnold Sommerfeld en 1915, est correct pour des électrons ponctuels, c.-à-d. qui ne tournent pas sur eux-mêmes. En réalité, l'électron a un spin 1/2; les niveaux d'énergie relativistes corrects apparaissent donc lorsque nous

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

fixons $l = j \pm 1/2$ dans la formule ci-dessus. Le résultat peut être approximé par

$$E_{nj} = -\frac{R}{n^2}\left(1 + \frac{\alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{j+\frac{1}{2}} - \frac{3}{4}\right) + \dots\right) . \tag{104}$$

Il reproduit le spectre de l'hydrogène avec une précision extrêmement bonne. Lorsque l'on compare ce résultat avec celui non relativiste, on note que chaque niveau non relativiste n est séparé en n niveaux différents. Cette séparation est illustrée sur la Figure 79.
Page 208
Lors d'expériences précises, la séparation des raies du spectre de l'hydrogène est bien visible; c'est ce que l'on appelle la *structure fine*. L'amplitude de la structure fine dépend de α, une constante fondamentale de la nature. Puisque c'est dans ce contexte qu'Arnold Sommerfeld a découvert l'importance de cette constante fondamentale, le nom qu'il avait choisi, la *constante de structure fine*, a été repris à travers le monde. La constante
Page 222
de structure fine décrit la *force* de l'interaction électromagnétique. Elle est la constante de couplage électromagnétique.

Des expériences modernes de haute précision montrent des effets supplémentaires qui modifient les couleurs de l'hydrogène atomique. Ils sont également illustrés sur la
Page 208
Figure 79. Les effets des particules virtuelles et le couplage du spin du proton apportent des corrections supplémentaires. Mais ce n'est pas tout: des effets isotopiques, des décalages Doppler et des décalages de niveau dus aux champs électriques et magnétiques de l'environnement influencent également le spectre de l'hydrogène. L'effet final sur le
Vol. V, page 125
spectre de l'hydrogène, le fameux décalage de Lamb, sera traité plus tard.

LES ÉQUATIONS D'ONDE RELATIVISTES – À NOUVEAU

> "The equation was more intelligent than I was.*"
> Paul Dirac, à propos de son équation, répétant une déclaration faite par Heinrich Hertz.

Quelle est l'équation d'évolution de la fonction d'onde dans le cas où la relativité, le spin et les interactions avec le champ électromagnétique sont pris en compte? On pourrait essayer de généraliser la représentation du mouvement relativiste donnée par
Page 118
Foldy et Wouthuysen au cas des particules en interaction avec un champ électromagnétique. Malheureusement, ce n'est pas un problème simple. L'identité simple entre la description classique et celle de la mécanique quantique disparait lorsque l'on introduit l'électromagnétisme.

La meilleure façon de décrire les particules quantiques *chargées* est d'utiliser une autre représentation équivalente de l'hamiltonien, qui avait été découverte beaucoup plus tôt, en 1926, par le physicien britannique Paul Dirac.** Dirac avait trouvé une belle astuce

* «L'équation était plus intelligente que je ne l'étais.»

** Paul Adrien Maurice Dirac (Bristol, 1902 – Tallahassee, 1984), physicien bilingue, il étudia l'électrotechnique à Bristol, puis est allé à Cambridge, où il est finalement devenu professeur, occupant la chaire que Newton avait autrefois occupée. Entre les années 1925 et 1933, il publia un grand nombre d'articles, dont plusieurs méritaient le prix Nobel (prix qu'il reçut en 1933). Dirac unifia la relativité restreinte et la théorie quantique, prédit l'antimatière, travailla sur le spin et les statistiques, prédit les monopôles magnétiques, spécula sur la loi des grands nombres, et bien d'autres. Son introversion, sa gentillesse et sa timidité, ainsi que sa profonde connaissance de la nature, combinées à un dévouement à la beauté de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

FIGURE 82 Paul Dirac (1902 – 1984).

pour extraire la racine carrée apparaissant dans l'opérateur d'énergie relativiste. Dans la représentation de Dirac, l'opérateur hamiltonien est donné par

$$H_{\text{Dirac}} = \beta m + \boldsymbol{\alpha} \cdot p \,. \tag{105}$$

La grandeur β et les trois composantes $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \boldsymbol{\alpha}$ se trouvent être des matrices complexes 4×4.

La représentation de Dirac comporte certaines particularités: l'opérateur de position x n'est pas la position de la particule, mais il a des termes supplémentaires; l'opérateur vitesse a seulement deux valeurs propres (plus ou moins la vitesse de la lumière); l'opérateur vitesse n'est pas simplement relié à l'opérateur de quantité de mouvement; l'équation du mouvement contient le fameux terme «Zitterbewegung»; le moment cinétique orbital et le spin ne sont pas des constantes du mouvement séparées.

Mais alors pourquoi utiliser cet hamiltonien horrible? Parce que seul l'hamiltonien de Dirac peut s'utiliser facilement dans le cas des particules chargées. En effet, il se transforme en hamiltonien couplé au champ électromagnétique à l'aide de ce que l'on nomme le *couplage minimal*, c.-à-d. par la substitution

Vol. III, page 85

$$\boldsymbol{p} \to \boldsymbol{p} - q\boldsymbol{A} \,, \tag{106}$$

qui traite l'impulsion électromagnétique comme la quantité de mouvement d'une particule. Avec cette prescription, l'hamiltonien de Dirac décrit le mouvement des particules chargées en interaction avec un champ électromagnétique $\boldsymbol{A}$. La substitution par le couplage minimale n'est pas possible avec l'hamiltonien de Foldy-Wouthuysen. Dans la représentation de Dirac, les particules sont des charges électriques pures, ponctuelles et sans structures, alors qu'avec la représentation de Foldy-Wouthuysen elles acquièrent un rayon de charge et une interaction de leur moment magnétique. (Nous en viendrons aux raisons plus loin, dans la section sur QED.)

Ref. 139

Pour plus de détails, la description la plus simple d'un électron (ou de toute autre particule élémentaire de spin 1/2, stable et chargée électriquement) est donnée par l'action

la physique théorique, ont fait de lui une légende dans le monde entier de son vivant. Pendant la seconde moitié de sa vie, il a essayé, sans succès, de trouver une alternative à l'électrodynamique quantique, dont il avait été le fondateur, car les problèmes liés à l'infini le repoussaient. Il est mort en Floride, où il avait vécu et travaillé après sa retraite de Cambridge.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

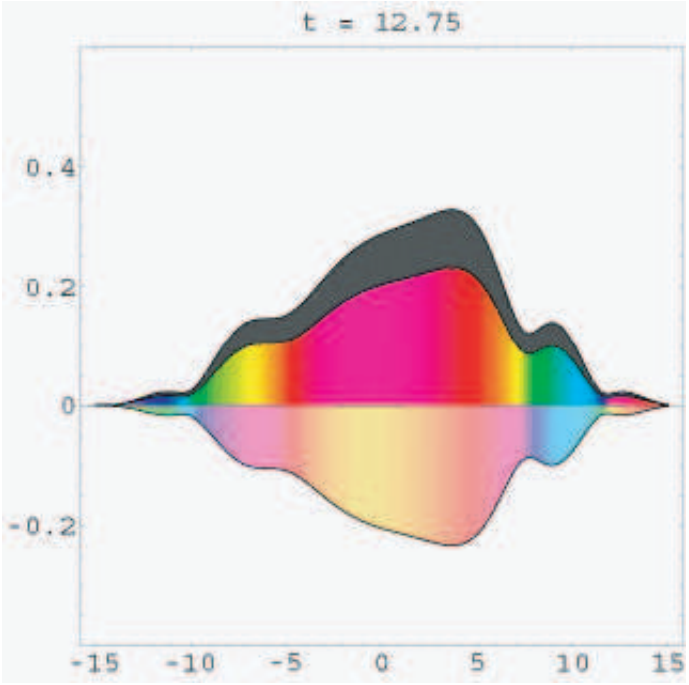


FIGURE 83 Le célèbre «Zitterbewegung» (que l'on peut traduire de l'allemand par «mouvement de tremblement» [N.d.T.]): la superposition d'états d'énergie positifs et négatifs conduit à une oscillation autour d'une vallée moyenne. La couleur indique la phase; deux courbes colorées sont représentées, car l'équation de Dirac pour une seule dimension n'a que deux composantes (et non pas quatre); la courbe grise est la densité de probabilité. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

S et le lagrangien

$$S = \int \mathcal{L}_{\text{QED}} d^4x \quad \text{où} \tag{107}$$

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = \overline{\psi}\,(i\hbar c \not{D} - c^2 m)\,\psi - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \quad \text{et}$$

$$\not{D}_\mu = \gamma^\mu (\partial_\mu - ieA_\mu)$$

Le premier terme du lagrangien (le terme de matière) conduit à l'équation de Dirac: il décrit comment le mouvement des particules élémentaires chargées et de spin 1/2 est affecté par les champs électromagnétiques. Le deuxième terme (le terme de rayonnement) conduit aux équations de Maxwell et décrit comment le mouvement des champs électromagnétiques est affecté par la fonction d'onde des particules chargées. Avec quelques astuces de calcul, ces équations décrivent ce que l'on appelle généralement l'*électrodynamique quantique*, ou QED* en abrégé.

Pour autant que l'on sache aujourd'hui, la description relativiste du mouvement de la matière chargée et des champs électromagnétiques à partir du lagrangien QED (107) est *parfaite*: aucune différence entre la théorie et l'expérience n'a jamais été trouvée, malgré des recherches intensives et malgré une récompense élevée pour quiconque en trouverait une. Toutes les prédictions connues sont entièrement en accord avec les mesures faites. Dans les cas les plus spectaculaires, la théorie et les mesures s'accordent avec plus de

* L'acronyme QED provient du terme anglais «quantum electrodynamics» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

treize chiffres significatifs. Mais au-delà de la précision de QED, certaines de ses caractéristiques qui manquent à l'électrodynamique classique sont encore plus intéressantes. Faisons-en une description rapide.

Une première familiarisation avec l'équation de Dirac

Le lagrangien QED implique que la fonction d'onde d'une particule chargée placée dans un potentiel suit l'équation de Dirac:

$$i\hbar\gamma^\mu(\partial_\mu - ieA_\mu)\psi = mc\psi \,. \tag{108}$$

Les nombreux indices ne doivent pas nous faire oublier que cette équation établit simplement que la valeur propre de l'opérateur impulsion-énergie est la masse au repos (multipliée par la vitesse de la lumière c). Autrement dit, l'équation établit que l'onde ψ se déplace avec une vitesse de phase c.

La fonction d'onde ψ a quatre composantes complexes. Deux décrivent le mouvement de particules, et deux le mouvement d'antiparticules. Chaque type de particule a besoin de deux composantes complexes, parce que l'équation décrit le spin et la densité de particule. Le spin est une rotation et une rotation nécessite trois paramètres réels. Le spin et la densité nécessitent donc quatre paramètres réels en tout, qui peuvent être combinés en deux nombres complexes pour les particules, et deux pour les antiparticules.

Chacune des quatre composantes de la fonction d'onde d'une particule relativiste
Défi 152 f tournant sur elle-même suit l'équation relativiste de Schrödinger-Klein-Gordon. Cela signifie que la relation impulsion-énergie relativiste s'applique à chaque composante séparément.

La fonction d'onde relativiste ψ a une propriété importante: une rotation de 2π change
Défi 153 f son signe; seule une rotation de 4π laisse la fonction d'onde inchangée. Ceci correspond au comportement typique des particules de spin 1/2. Pour cette raison, la fonction d'onde à quatre composantes d'une particule de spin 1/2 s'appelle un *spineur*.

L'antimatière

Le terme «antimatière» est aujourd'hui familier. Il est intéressant de noter que le concept est apparu *avant* même que l'on ait pu en apporter des évidences expérimentales. L'expression relativiste de l'énergie E d'un électron de charge e placé dans un champ produit par une charge Q est

$$E + \frac{Qe}{4\pi\varepsilon_0 r} = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \,. \tag{109}$$

Celle expression autorise également des solutions avec une énergie *négative* et une charge opposée $-e$ lorsque l'on utilise la racine négative. La théorie quantique montre que ceci est une propriété générale, et ce sont ces solutions que l'on appelle l'*antimatière*.

En effet, l'antiparticule compagnon de l'électron a été prédite dans les années 1920 par Paul Dirac à partir de son équation (108), qui est basée sur la relation d'énergie relativiste (109). Sans même connaître cette prédiction, Carl Anderson découvrit l'antiparticule de l'électron en 1932, et lui donna le nom de «*positron*». (Le nom correct aurait dû être «po-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

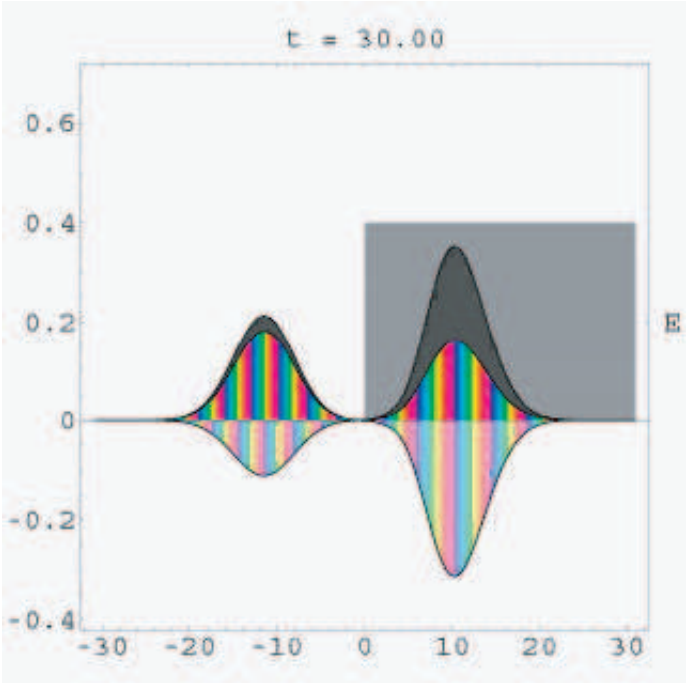


FIGURE 84 Le paradoxe de Klein: le mouvement d'une fonction d'onde relativiste lorsqu'elle rencontre un potentiel abrupt. Une partie de la fonction d'onde est transmise. Cette partie correspond à de l'antimatière, comme le montre la composante inférieure plus importante. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

siton», sans le «r», qui est utilisé par la langue française.*) Anderson étudiait les rayons cosmiques, et il remarqua que certains «électrons» tournaient dans le mauvais sens dans le champ magnétique auquel il soumettait son appareil. Il vérifia minutieusement son installation et en déduisit finalement qu'il avait trouvé une particule de même masse que l'électron mais avec une charge électrique positive.

L'existence des positons a de nombreuses implications étranges. Dès 1928, avant même leur découverte, le théoricien suédois Oskar Klein avait fait remarquer que l'équation de Dirac faisait une prédiction étrange pour les électrons: lorsqu'un électron percutait une barrière de potentiel suffisamment abrupte, le coefficient de réflexion était plus grand que l'unité. Une telle barrière réfléchissait donc *plus* que ce qu'elle recevait. D'autre part, une grande partie de la fonction d'onde était transmise à travers la barrière. En 1935, après la découverte du positon, Werner Heisenberg et Hans Euler expliquèrent le
Ref. 140 paradoxe. Ils trouvèrent que l'équation de Dirac prédisait que chaque fois qu'un champ électrique excédait la valeur critique

$$E_c = \frac{m_e c^2}{e\lambda_e} = \frac{m_e^2 c^3}{e\hbar} = 1,3\,\mathrm{EV/m}\,, \tag{110}$$

le vide générait spontanément des paires électron-positon, qui étaient alors séparées par le champ. En conséquence le champ initial était réduit. Ce phénomène, que l'on appelle

* Bien que la forme incorrecte «positron» soit parfois également utilisée, de même que le terme «antiélectron» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

la *polarisation du vide*, est la raison pour le coefficient de réflexion plus grand que l'unité qu'avait trouvé Klein. En effet, les potentiels abrupts correspondent à des champs électriques élevés.

La polarisation du vide montre que, contrairement à la vie quotidienne, le *nombre* de particules n'est pas constant dans le domaine microscopique. Il se trouve que c'est uniquement la *différence* entre le nombre de particules et le nombre d'antiparticules qui se conserve. La polarisation du vide limite donc notre capacité à compter les particules dans la nature!

La polarisation du vide est un effet faible. Il n'a été observé que lors des collisions entre particules de hautes énergies. Dans ces cas, l'effet augmente même la constante de structure fine! Vol. V, page 153 Plus loin, nous décrirons des exemples vraiment gigantesques de polarisation du vide qui sont postulés autour de trous noirs chargés.

Bien sûr, la génération de paires électron-positon n'est pas une *création* à partir de rien, mais une *transformation* d'énergie en matière. De tels processus font partie de toute description relativiste de la nature. Malheureusement, les physiciens ont l'habitude d'appeler cette transformation une «création de paire», ce qui ajoute une certaine confusion à la question. La transformation est décrite par la théorie quantique des champs, que nous explorerons dans le prochain volume.

Les particules virtuelles

Malgré ce que nous avons dit jusqu'à présent, les valeurs d'action plus petites que l'action minimale ont tout de même un rôle à jouer. Nous avons déjà rencontré un exemple: lors d'une collision entre deux électrons, il se produit un échange de photons virtuels. Page 71 Nous avons appris que les photons virtuels échangés ne pouvaient pas être observés. En effet, l'action S pour cet échange obéit à

$$S \leqslant \hbar \,. \tag{111}$$

En bref, les particules *virtuelles* n'apparaissent qu'en tant que médiateurs des interactions. On ne peut pas les observer. Au contraire des particules *réelles* ordinaires, les particules virtuelles n'obéissent pas à la relation $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$. Par exemple, leur énergie cinétique peut être négative. En effet, les particules virtuelles sont l'opposé des particules «libres» (ou réelles). Il est possible de les observer dans le vide si le temps de mesure est très court. Elles ont intrinsèquement des durées de vie très courtes.

Les photons virtuels sont à l'origine des potentiels électrostatiques, des champs magnétiques, de l'effet Casimir, de l'émission spontanée, des forces de van der Waals et du décalage de Lamb dans les atomes. Un traitement plus approfondit montre que dans chaque situation qui fait intervenir des photons virtuels il y a aussi, avec une probabilité encore plus faible, des électrons et des positons virtuels.

Les particules virtuelles massiques sont essentielles à la polarisation du vide, à la limite du nombre d'éléments dans la nature, au rayonnement d'évaporation des trous noirs et à l'effet Unruh. Les particules virtuelles massiques jouent également un rôle dans l'interaction forte, où ce sont elles qui maintiennent les nucléons ensemble dans le noyau, ainsi que dans l'interaction nucléaire faible, où elles expliquent pourquoi le rayonnement beta existe et pourquoi le Soleil brille.

En particulier, les paires particule-antiparticule virtuelles massiques et les particules

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

virtuelles de rayonnement forment ensemble ce que l'on appelle le *vide*. En plus de cela, les particules virtuelles de rayonnement forment ce que l'on appelle habituellement les champs statiques. Les particules virtuelles sont nécessaires pour une description complète de toutes les interactions. En particulier, les particules virtuelles sont responsables de tous les processus de désintégration.

Curiosités et défis amusants concernant la couleur et les atomes

Où trouve-t-on la mer la plus bleue? L'eau de mer, comme l'eau douce, est bleue parce qu'elle absorbe la lumière rouge et la lumière verte. L'absorption est due à une bande de vibration de la molécule d'eau qui est la conséquence d'une combinaison d'extensions moléculaires symétriques et asymétriques. L'absorption est faible, mais perceptible. À 700 nm (rouge), la profondeur d'eau qui produit une absorption de $1/e$ est de 1 m.

Ref. 141

L'eau de mer peut également être de couleur vive si le fond marin réfléchit la lumière. De plus, l'eau de mer peut être verte, si elle contient des petites particules qui diffusent ou absorbe la lumière bleue. Le plus souvent, ces particules sont de la terre ou du plancton. (Les satellites peuvent mesurer la concentration de plancton à partir de l'intensité du vert dans la couleur de la mer.) La mer est donc essentiellement bleue si elle est profonde, calme et froide; dans ce cas, le fond est loin de la surface, la terre ne se mélange pas à l'eau et la concentration de plancton est faible. La mer des Sargasses fait 5 km de profondeur, elle est calme et froide durant une grande partie de l'année. On dit souvent qu'elle est la *plus bleue* de toutes les eaux de la Terre.

Les lacs peuvent également être bleu s'ils contiennent des petites particules minérales. Les particules diffusent la lumière et donnent une couleur bleue pour une raison similaire à celle qui donne sa couleur bleue au ciel. On trouve de tels lacs bleus dans de nombreux endroits sur Terre.

* *

Concernant les mesures modernes de haute précision des spectres de l'hydrogène, vous pouvez écouter le maître incontesté dans le domaine: profitez de la conférence de 2012 de Theodor Hänsch, qui a consacré une grande partie de sa vie au sujet. Elle se trouve sur www.mediatheque.lindau-nobel.org.

* *

L'atome d'hydrogène présente de nombreux aspects fascinants. En 2015, Friedmann et Hagen ont montré qu'une formule bien connue pour $\pi = 3,14159265...$ pouvait être extraite du spectre des couleurs. La mécanique quantique et les couleurs sont en effet de bien beaux sujets.

Ref. 142

* *

Si les atomes contiennent des électrons qui circulent sur des orbites, la rotation de la Terre, via l'accélération de Coriolis, devrait avoir un effet sur leur mouvement, et donc sur la couleur des atomes. Cette belle prédiction est due à Mark Silverman, mais l'effet est cependant si faible qu'il n'a pas encore été mesuré.

Ref. 136

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

La lumière est diffractée par des réseaux de matière. La matière peut-elle être diffractée par des réseaux de lumière? Aussi surprenant que cela puisse paraître, elle le peut, comme l'avaient prédit Dirac et Kapitza en 1937. Cela a été réalisé pour la première fois en 1986, en utilisant des atomes. Pour des électrons libres, l'exploit est plus difficile. La confirmation la plus claire est survenue en 2001, lorsqu'une nouvelle technologie de lasers a été utilisée pour produire des mesures superbes de maximums de diffraction typiques des électrons diffractés par un réseau de lumière.

Ref. 143

* *

La lumière est totalement réfléchie lorsqu'elle est dirigée vers un matériau dense sous un angle suffisamment grand pour qu'elle ne puisse pas pénétrer dans le matériau. Un groupe de physiciens russes a montré que si le matériau dense était excité, l'intensité du faisceau totalement réfléchi pouvait être *amplifiée*. On ne sait pas encore si cela conduira un jour à des applications.

Ref. 136

* *

La façon dont les gens manipulent des atomes *individuels* avec des champs électromagnétiques fournit un grand nombre de jolis exemples de technologies modernes appliquées. De nos jours, il est possible de faire léviter, de piéger, d'exciter, de photographier, de désexciter et de déplacer des atomes individuels simplement en les éclairant. En 1997, le prix Nobel de physique a été décerné aux initiateurs de ce domaine: Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Philips.

Vol. I, page 344
Ref. 144

* *

En utilisant deux miroirs et quelques photons, il est possible de capturer un atome et de le faire flotter entre les deux miroirs. Cet exploit, l'une des nombreuses façons qui permettent d'isoler des atomes individuels, est désormais une pratique courante en laboratoires. Pouvez-vous imaginer comment le faire?

Ref. 145
Défi 154 e

* *

Un exemple de recherche moderne est l'étude des atomes *creux*, c.-à-d. des atomes auxquels il manque un certain nombre d'électrons internes. Ils ont été découverts en 1990 par J.P. Briand et son équipe. Ils apparaissent lorsqu'un atome complètement ionisé, c.-à-d. sans électrons, est mis en contact avec un métal. Les électrons acquis orbitent alors sur les couches externes, laissant les couches internes vides, en contraste frappant avec les atomes habituels. De tels atomes creux peuvent également être produits par un rayonnement laser intense.

Ref. 146

* *

Les effets quantiques relativistes peuvent être observés à l'œil nu. Les deux plus importants concernent l'or et le mercure. La couleur jaune de l'or (dont le numéro atomique est 79) est due à l'énergie de la transition entre les électrons 5d et 6s, qui absorbe la lumière bleue. Sans effets relativistes, cette transition se situerait dans l'ultraviolet, similaire à la transition entre les électrons 4d et 5s de l'argent, et l'or serait incolore. La couleur jaune de l'or est donc un effet relativiste.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Le mercure (dont le numéro atomique est 80) a sa couche 6s remplie. En raison des mêmes effets relativistes qui apparaissent dans le cas de l'or, ces couches sont contractées et n'aiment pas former des liaisons. Pour cette raison, le mercure est encore liquide à température ambiante, contrairement à tous les autres métaux. La relativité est donc la raison pour laquelle le mercure est liquide, et que les thermomètres fonctionnent.

* *

Défi 155 e Le phosphore est-il phosphorescent?

* *

Il est possible de détecter le passage d'un seul photon à travers un appareil sans
Défi 156 pe l'absorber. Comment feriez-vous cela?

Les propriétés des matériaux

Comme pour la taille de l'atome d'hydrogène, la taille de tous les autres atomes est également fixée par le quantum d'action. En effet, le quantum d'action détermine dans une large mesure les interactions entre les électrons. Ce faisant, le quantum de changement détermine toutes les interactions entre les atomes dans la matière quotidienne. Il détermine donc toutes les autres propriétés des matériaux. L'élasticité, la plasticité, la fragilité, les propriétés magnétiques et électriques des matériaux sont également fixées par le quantum d'action. C'est $\hbar$ à lui seul qui rend l'électronique possible! Nous étudierons quelques exemples de propriétés des matériaux dans le prochain volume. Divers détails de la relation générale entre $\hbar$ et les propriétés des matériaux sont encore un sujet de recherche, bien qu'aucun ne soit en contradiction avec le quantum d'action. La recherche dans le domaine des matériaux est l'une des plus importantes de la science moderne, et la plupart des améliorations de notre niveau de vie en résultent. Nous explorerons quelques-uns de ces aspects dans le prochain volume.

En résumé, la science des matériaux a confirmé que la physique quantique était également la description correcte de tous les matériaux. La physique quantique a confirmé que toutes les propriétés des matériaux de la vie quotidienne avaient une origine électromagnétique. La physique quantique a également confirmé que toutes les propriétés des matériaux de la vie quotidienne étaient dues à des interactions impliquant des électrons.

Un défi de taille: la force de l'électromagnétisme

Le grand physicien Wolfgang Pauli répétait souvent qu'après sa mort, la première chose qu'il demanderait à Dieu serait d'expliquer la constante de structure fine de Sommerfeld. (D'autres avaient l'habitude de commenter qu'après que Dieu le lui aura expliqué, il réfléchirait un peu, puis s'exclamerait: «Faux!»)

La *constante de structure fine*, introduite par Arnold Sommerfeld, est la constante de
Ref. 147 la nature sans dimension dont la valeur est mesurée comme étant égale à

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137,035\,999\,679(94)} \approx 0,007\,297\,352\,5376(50)\,. \qquad (112)$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ce nombre est apparu pour la première fois lors de l'explication de la structure fine du spectre des couleurs émises par les atomes, d'où son nom étrange. Sommerfeld avait été
Ref. 148 le premier à comprendre son importance générale. Elle est fondamentale en électrodynamique quantique pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la constante de structure fine décrit la *force* de l'électromagnétisme. Le nombre α résulte de l'interaction entre deux charges électriques e. Si on écrit la loi de Coulomb pour la force F entre deux électrons sous la forme

$$F = \alpha \frac{\hbar c}{r^2} \,, \tag{113}$$

il apparaît clairement que la constante de structure fine décrit la force de l'électromagnétisme. Une valeur plus élevée de la constante de structure fine α signifierait une attraction ou une répulsion plus forte entre les objets chargés. C'est donc la valeur de α qui détermine la taille des atomes (et donc de toutes choses), de même que toutes les couleurs dans la nature.

Deuxièmement, c'est seulement parce que la constante de structure fine α est très petite que l'on peut parler de particules. En effet, ce n'est que parce que la constante de structure fine est bien plus petite que 1 qu'il est possible de distinguer les particules les unes des autres. Si la valeur de α était proche de 1, ou plus grande, les particules interagiraient si fortement qu'il ne serait pas possible de les observer séparément, ni même de parler de particules.

Ceci nous amène à la troisième raison de l'importance de la constante de structure fine. Puisqu'il s'agit d'un nombre sans dimension, elle implique un mécanisme encore inconnu qui fixe sa valeur. Découvrir ce mécanisme est l'un des défis qu'il nous reste à relever avant de terminer notre aventure. Tant que le mécanisme reste inconnu (comme c'est toujours le cas en 2016), nous ne pouvons comprendre la couleur et la taille d'aucune des choses qui nous entourent!

Des petites variations de la force d'attraction électromagnétique entre les électrons et les protons auraient de nombreuses conséquences importantes. Pouvez-vous décrire ce qui se passerait pour la taille des gens, pour la couleur des objets, pour la couleur du Soleil, ou pour le fonctionnement des ordinateurs si la force devait doubler? Et que se passerait-il si elle devait graduellement diminuer jusqu'à la moitié de sa valeur habi-
Défi 157 e tuelle?

Depuis les années 1920, expliquer la valeur de α a été considéré comme l'un des défis les plus difficiles auxquels la physique moderne ait été confrontée. C'est la raison pour les idées fantasques de Pauli. En 1946, lors de son discours de prix Nobel, il avait répété l'affirmation selon laquelle une théorie qui ne déterminait pas ce nombre ne pouvait pas
Ref. 149 être complète. Depuis cette époque, les physiciens semblent se diviser en deux classes: ceux qui n'ont pas osé relever le défi, et ceux qui n'en ont aucune idée. Cette histoire fascinante n'est toujours pas terminée.

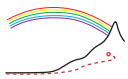
Le problème de la constante de structure fine est si profond que beaucoup s'égarent en chemin. Par exemple, il est parfois prétendu qu'il est impossible de changer les unités physiques de telle sorte que $\hbar$, c et e seraient toutes égales à 1 en même temps, car cela changerait la valeur de $\alpha = 1/137,036...(1)$. Pouvez-vous expliquer pourquoi cet
Défi 158 e argument est faux?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

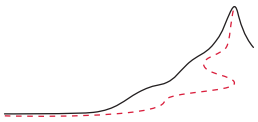
Un résumé sur les couleurs et les matériaux

En résumé, le quantum d'action $\hbar$ (lorsqu'on l'associe à l'interaction entre les champs électromagnétiques et les électrons au sein des atomes, des molécules, des liquides et des solides) détermine la taille, la forme, la couleur et les propriétés matérielles de toutes les choses qui nous entourent. Le quantum d'action détermine les propriétés mécaniques telles que la dureté ou l'élasticité, les propriétés magnétiques, les propriétés thermiques telles que la capacité thermique ou la chaleur latente de condensation, les propriétés optiques telle que la transparence, et les propriétés électriques telle que la brillance des métaux. De plus, le quantum d'action détermine tous les aspects chimiques et biologiques de la matière. Ces aspects font l'objet de notre prochain volume.

La force de l'interaction électromagnétique est décrite par la constante de structure fine $\alpha \approx 1/137,036$. Sa valeur est toujours inexpliquée.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chapitre 9

Pour résumer la physique quantique

Si on la compare à la physique classique, la théorie quantique est nettement plus compliquée. Pourtant, l'idée fondamentale est simple: dans la nature, il y a un changement minimal (une action minimale) de valeur $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js. Plus précisément, toute la théorie quantique peut se résumer en une seule phrase:

▷ Dans la nature, des actions (des changements) plus petites que $\hbar = 1,054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js ne sont jamais observées.

Cette valeur d'action minimale, le *quantum d'action*, conduit à toutes les observations étranges que l'on fait dans le domaine microscopique. Ce sont par exemple, le comportement ondulatoire de la matière, les relations d'indétermination, la décohérence, le caractère aléatoire des mesures, l'indistinguabilité, la quantification du moment cinétique, l'effet tunnel, la création de paires, la désintégration et les réactions entre particules.

Le point essentiel de la théorie quantique est donc l'absence de changement infiniment petit. Les mathématiques de la théorie quantique sont cependant abstraites et compliquées. Cette partie de notre promenade en valait-elle la peine? Elle la valait: les résultats sont profonds et l'exactitude de la description est *complète*. Dans ce chapitre, nous commençons par un aperçu de ces résultats, puis nous nous penchons sur les questions qui ne sont pas encore résolues.

Les résultats physiques de la théorie quantique

L'existence d'une valeur d'action minimale dans la nature conduit directement à la leçon principale que nous avons apprise sur le mouvement au cours de la partie quantique de notre aventure:

▷ Tout ce qui est en mouvement est constitué de quantons (de particules quantiques).

Cette affirmation s'applique à tous les systèmes physiques, et donc à tous les objets et à toutes les images, c.-à-d. à toute matière et à tout rayonnement. Les choses qui se déplacent sont constituées de *quantons*. Les pierres, les ondes à la surface de l'eau, la lumière, les ondes sonores, les tremblements de terre, la gélatine et toutes les autres choses avec lesquelles nous pouvons interagir, sont constitués de particules quantiques.

Au cours de notre exploration de la relativité, nous avons découvert que les horizons

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

et le vide pouvaient également se déplacer. Mais si toutes les entités qui se déplacent sont constituées de particules quantiques, quelles sont les implications pour les horizons et l'espace vide? Nous pouvons prétendre que l'on ne s'attend à aucun problème fondamental avec les horizons, parce qu'une façon de les décrire est de les considérer comme étant dans un état extrême de la matière. Mais les détails de l'aspect quantique du vide ne sont pas simples. Ils feront l'objet de la dernière partie de notre aventure.

Un peu plus tôt dans notre aventure nous nous sommes posé la question: que sont la matière, le rayonnement et les interactions? Maintenant nous le savons: ils sont des composites de particules quantiques élémentaires. En particulier, les interactions sont des échanges de particules quantiques élémentaires.

Vol. II, page 293
Vol. II, page 322

Une *particule quantique élémentaire* est une entité que l'on peut compter et qui est plus petite que sa propre longueur d'onde de Compton. Toutes les particules élémentaires sont décrites par leur impulsion-énergie, leur masse, leur spin et leurs parités C, P et T. Pourtant, comme nous le verrons dans le prochain volume, ceci n'est toujours pas la liste complète des propriétés des particules. En ce qui concerne les propriétés *intrinsèques* des particules quantiques, c.-à-d. celles qui ne dépendent pas de l'observateur, la théorie quantique affirme simplement que

> ▷ Dans la nature, toutes les propriétés intrinsèques des particules quantiques (à l'exception de la masse), telles que le spin, la charge électrique, la charge de couleur*, les parités, etc., apparaissent comme des multiples entiers d'une unité de base. Et étant donné que tous les systèmes physiques sont constitués de particules quantiques, toutes les propriétés intrinsèques des systèmes composites (à l'exception de la masse**) soit s'additionnent soit se multiplient.

Page 143

En résumé, toutes les entités qui se déplacent sont constituées de particules quantiques décrites par des propriétés intrinsèques *discrètes*. Pour comprendre à quel point ce résultat est profond, vous pouvez l'appliquer à toutes les entités qui se déplacent et pour lesquelles il est habituellement oublié, tel qu'aux fantômes, aux esprits, aux anges, aux nymphes, aux démons, aux diables, aux dieux, aux déesses et aux âmes. Vous pouvez vérifier par vous-même ce qui se passe lorsque leur nature particulaire est prise en compte.

Défi 159 f

> « Deorum injuriae diis curae.*** »
> Tibère, tel que rapporté par Tacite.

Résultats concernant le mouvement des particules quantiques

Les quantons (les particules quantiques) diffèrent des particules de la vie quotidienne car elles *interférent* et elles se comportent comme un mélange de particules et d'ondes. Cette propriété découle directement de l'existence de $\hbar$, la plus petite action possible dans la

* La charge de couleur est une propriété liée à l'interaction forte [N.d.T.].
** Plus précisément, en plus de la masse, les angles de mélange ne sont pas non plus quantifiés. Ces propriétés seront définies dans le prochain volume.
*** «C'est aux Dieux seuls de se soucier des offenses faites aux Dieux.» (Traduction donnée par Voltaire dans son Traité sur la tolérance [N.d.T.].)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nature. À partir de l'existence de $\hbar$, la théorie quantique déduit tous ses énoncés relatifs au mouvement des particules quantiques. Nous résumons ici les principaux.

Il n'y a *pas de repos* dans la nature. Tous les objets obéissent à la relation d'indétermination qui établit que les indéterminations sur la position x et sur la quantité de mouvement p vérifient

$$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2 \quad \text{avec} \quad \hbar = 1,1 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}\,, \tag{114}$$

ce qui rend impossible le repos. L'état des particules quantiques est défini par les mêmes observables qu'en physique classique, à la différence près que les observables ne commutent pas. La physique classique apparait dans la limite où la constante de Planck $\hbar$ peut effectivement être réduite à zéro.

La théorie quantique introduit un *élément probabiliste* dans le mouvement. Les probabilités résultent du quantum d'action au travers des interactions avec les thermostats qui font partie de l'environnement de tout système physique. De manière équivalente, les probabilités apparaissent lors de toute expérience qui tente de produire un changement plus petit que le quantum d'action.

Les particules quantiques *se comportent comme des ondes*. La longueur d'onde de de Broglie λ qui leur est associée est donnée par la quantité de mouvement p suivant la relation

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p} \tag{115}$$

qui est valide aussi bien dans le cas de la matière que dans celui du rayonnement. Cette relation est à l'origine du comportement ondulatoire de la lumière et de la matière. Les particules de lumière s'appellent des photons. Leur observation est désormais une pratique courante. La théorie quantique stipule que les ondes de particules, comme toutes les ondes, interfèrent, se réfractent, se dispersent, s'amortissent, peuvent être amorties et peuvent être polarisées. Ceci s'applique aux photons, aux électrons, aux atomes et aux molécules. Toutes les ondes étant constituées de particules quantiques, elles peuvent toutes être vues, touchées et déplacées. La lumière, par exemple, peut être «vue» par diffusion photon-photon dans le vide à haute énergie, elle peut être «touchée» en utilisant l'effet Compton et elle peut être «déplacée» par courbure gravitationnelle. Les particules de matière, telles que les molécules ou les atomes, peuvent être vues à l'aide de microscopes électroniques et peuvent être touchées et déplacées à l'aide de microscopes à force atomique. L'interférence et la diffraction des ondes de particules sont observées quotidiennement au microscope électronique.

On peut s'imaginer les ondes de matière comme des nuages qui *tournent localement* sur eux même. Dans la limite où la taille du nuage est négligeable, les particules quantiques peuvent être imaginées comme des petites flèches tournantes. De manière équivalente, les quantons ont une *phase*.

Des particules *ne peuvent pas être enfermées* pour toujours. Même si la matière est impénétrable, la théorie quantique montre qu'il n'existe pas de boîtes hermétiques ou d'obstacles insurmontables. L'enfermement n'est jamais éternel. Attendre assez longtemps nous permet toujours de surmonter n'importe quelle barrière, car il existe une probabilité non nulle de surmonter n'importe quel obstacle. Ce processus est appelé

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'*effet tunnel* lorsqu'il est vu du point de vue spatial, et *désintégration* lorsqu'il est vu du point de vue temporel. L'effet tunnel explique le fonctionnement des tubes de télévision ainsi que la décroissance radioactive.

Il est *possible de faire tourner* toutes les particules et tous les faisceaux de particules. Les particules possèdent un moment cinétique intrinsèque appelé le *spin*, qui spécifie leur comportement lors des rotations. Les bosons sont de spin entier, alors que les fermions sont de spin demi-entier. Un nombre pair de fermions liés ou un nombre quelconque de bosons liés produit un boson composite. Un nombre impair de fermions liés produit un fermion de faible énergie. Les solides sont impénétrables en raison du caractère fermionique des électrons au sein des atomes.

Les particules identiques sont *indistinguables*. Le rayonnement est constitué de particules indistinguables que l'on appelle des bosons alors que la matière est constituée de fermions. Lors d'un échange de deux fermions situés en deux points ayant une séparation de genre espace, la fonction d'onde change de signe, alors que pour deux bosons la fonction d'onde reste inchangée. Toutes les autres propriétés des particules quantiques sont les mêmes que pour les particules classiques, à savoir: la possibilité de les compter, les interactions, la masse, la charge, le moment cinétique, l'énergie, la quantité de mouvement, la position, ainsi que l'impénétrabilité dans le cas de la matière et la pénétrabilité dans le cas du rayonnement. Les duplicateurs parfaits n'existent pas.

Lors des collisions, les particules *interagissent localement* par échange d'autres particules. Lorsque des particules de matière entrent en collision, elles interagissent par l'échange de bosons virtuels.* Le changement du mouvement est donc dû à un échange de particules. Les bosons d'échange de spin pair ne contrôlent que les interactions attractives. Les bosons d'échange de spin impair contrôlent aussi les interactions répulsives.

Les propriétés des collisions impliquent la non-conservation du nombre de particules. Au cours des collisions, des particules peuvent apparaître (c'est-à-dire qu'elles peuvent être «créées») ou disparaître (c'est-à-dire qu'elles peuvent être «annihilées»). Ceci est valable à la fois pour les bosons et pour les fermions.

Les propriétés des collisions impliquent l'existence d'*antiparticules*, que l'on observe régulièrement au cours des expériences. Les fermions élémentaires, contrairement à de nombreux bosons élémentaires, diffèrent de leurs antiparticules: ils ne peuvent être créés et annihilés que par paires. Les fermions élémentaires ont une masse non nulle et se déplacent plus lentement que la lumière.

Les particules peuvent se *désintégrer* et se *transformer*. Des investigations détaillées montrent que les collisions impliquent la non-conservation du type de particules. Au cours des collisions, certaines particules peuvent modifier leurs propriétés intrinsèques. Cette observation sera détaillée dans le prochain volume. De plus, le quantum d'action implique que les choses se *cassent* et que les êtres vivants *meurent*.

Les images, constituées de rayonnement, sont décrites par les mêmes observables que la matière: position, phase, vitesse, masse, quantité de mouvement, etc. (bien que leurs valeurs et leurs relations diffèrent). Les images ne peuvent être localisées qu'avec une précision équivalente à la longueur d'onde λ du rayonnement qui les produit.

L'apparition de la constante de Planck $\hbar$ implique que des *échelles de longueur* et

* Les particules virtuelles sont parfois qualifiées de «off shell» ou encore de «off the mass shell» dans la littérature anglaise [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

des *échelles de temps* existent dans la nature. La théorie quantique introduit des sautillements fondamentaux dans chaque exemple de mouvement. Ainsi, l'infiniment petit est éliminé. De cette façon, il apparaît des limites inférieures aux dimensions structurelles et à de nombreuses autres quantités mesurables. En particulier, la théorie quantique montre qu'il est impossible que de petites créatures puissent vivre sur les électrons d'un atome de la même manière que les êtres humains vivent sur la Terre tournant autour du Soleil. La théorie quantique montre que Lilliput ne peut pas exister.

Les horloges et les règles à mesurer ont une *précision finie*, du fait de l'existence d'une action minimale ainsi que de leurs interactions avec des thermostats. D'autre part, tous les appareils de mesure doivent contenir des thermostats, car sinon ils ne seraient pas en mesure d'enregistrer des résultats.

Ref. 150

Les effets quantiques ne laissent aucune place à la fusion froide, à l'astrologie, à la téléportation, à la télékinésie, aux phénomènes surnaturels, à la création à partir de rien, aux univers multiples ou aux phénomènes plus rapides que la lumière (malgré le paradoxe

Page 173

EPR).

Réalisations en termes d'exactitude et de précision

Outre les changements conceptuels, la théorie quantique a amélioré la précision des prédictions. En mécanique classique, on obtient couramment une précision de quelques chiffres significatifs (lorsqu'il y en a). La mécanique quantique, en revanche, apporte une précision comparable au nombre total de chiffres significatifs (parfois jusqu'à treize) qu'il est actuellement possible de mesurer. La limite de la précision n'est généralement *pas* due à l'inexactitude de la théorie, mais à la précision des mesures. En d'autres termes, l'accord entre la théorie et l'expérience n'est limité que par la somme d'argent que l'expérimentateur est prêt à dépenser. Le Tableau 8 montre cela plus en détail.

TABLEAU 8 Quelques comparaisons choisies entre la physique classique, la théorie quantique et l'expérience.

Observable	Prédiction classique	Prédiction de la théorie quantique[a]	Mesure	Estimation du coût
Mouvement simple des corps				
Indétermination	0	$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar/2$	10 k€
Longueur d'onde de la matière	aucune	$\lambda p = 2\pi\hbar$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar$	10 k€
Longueur d'onde de Compton	aucune	$\lambda_c = h/m_e c$	$(1 \pm 10^{-3})\,\lambda$	20 k€
Taux de création de paire	0	σE	en accord	100 k€
Temps de décroissance radioactive de l'hydrogène	aucune	$\tau \sim 1/n^3$	(1 ± 10^{-2})	5 k€
Moment cinétique minimum	0	$\hbar/2$	$(1 \pm 10^{-6})\,\hbar/2$	10 k€

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

OBSERVABLE	PRÉDICTION CLASSIQUE	PRÉDICTION DE LA THÉORIE QUANTIQUE[a]	MESURE	ESTIMATION DU COÛT
Effet/pression Casimir	0	$p = (\pi^2\hbar c)/(240r^4)$	(1 ± 10^{-3})	30 k€
Couleurs des objets				
Spectre des objets chauds	diverge	$\lambda_{max} = hc/(4,956\,kT)$	$(1 \pm 10^{-4})\ \Delta\lambda$	10 k€
décalage de Lamb	aucune	$\Delta\lambda = 1057,86(1)$ MHz	$(1 \pm 10^{-6})\ \Delta\lambda$	50 k€
Constante de Rydberg	aucune	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$(1 \pm 10^{-9})\ R_\infty$	50 k€
Constante de Stefan-Boltzmann	aucune	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	$(1 \pm 3 \cdot 10^{-8})\,\sigma$	20 k€
Constante de la loi du déplacement de Wien	aucune	$b = \lambda_{max} T$	$(1 \pm 10^{-5})\ b$	20 k€
Indice de réfraction de l'eau	aucune	1,34	à quelques % près	1 k€
Diffusion photon-photon	0	selon QED: non nulle	en accord	50 M€
Rapport gyromagnétique de l'électron	1 ou 2	2,002 319 304 365(7)	2,002 319 304 361 53(53)	30 M€
Moment magnétique anormal du muon	0	$11\,659\,1827(63) \cdot 10^{-11}$	$11\,659\,2080(60) \cdot 10^{-11}$	100 M€
Propriétés de la matière composite				
Durée de vie des atomes	≈ 1 µs	∞	$> 10^{20}$ a	1 €
Séparation hyperfine du muonium	aucune	4 463 302 542(620) Hz	4 463 302 765(53) Hz	1 M€
Taille et forme des molécules	aucune	selon QED	à 10^{-3} près	20 k€

a. Toutes ces prédictions sont calculées à partir des constantes physiques fondamentales données en annexe A.

Page 243

Nous remarquons que les valeurs prédites *ne diffèrent pas* de celles mesurées. Si on se souvient que la physique classique ne permet de calculer aucune des valeurs mesurées, on se fait une idée des progrès réalisés par la physique quantique. Cette avancée dans la compréhension est due à l'introduction du quantum d'action $\hbar$. De manière équivalente, nous pouvons affirmer qu'aucune description de la nature n'est complète sans le quantum d'action.

En résumé, la théorie quantique est précise et exacte. Dans le domaine microscopique, la théorie quantique est en concordance *parfaite* avec la nature. Malgré des perspectives de gloire et de richesse, et malgré le plus grand nombre de chercheurs que l'on ait jamais eu, aucune contradiction entre l'observation et la théorie n'a été trouvée à ce jour. Mais d'un autre côté, expliquer la valeur que l'on mesure pour la constante de structure fine, $\alpha = 1/137,035\,999\,074(44)$, est toujours d'actualité en ce qui concerne l'interaction électromagnétique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

La théorie quantique est-elle magique?

Étudier la nature, c'est un peu comme faire l'expérience de la magie. La nature a souvent une apparence différente de ce qu'elle est. Lors d'une séance de magie nous sommes trompés (mais seulement si nous oublions nos propres limites). Lorsque nous commençons à nous considérer comme faisant partie du jeu, nous commençons à comprendre les astuces. C'est tout le plaisir de la magie. Il en va de même pour le mouvement quantique.

* *

La nature semble irréversible, bien qu'elle ne le soit pas. Nous ne nous souvenons jamais du futur. Nous sommes trompés parce que nous somme macroscopiques.

* *

La nature semble privilégier la décohérence bien que ce ne soit pas le cas. Encore une fois, nous sommes trompés parce que nous somme macroscopiques.

* *

Il n'y a pas d'horloges dans la nature. Nous sommes trompés par celles de la vie quotidienne parce que nous sommes entourés par un nombre gigantesque de particules.

* *

Le mouvement semble souvent disparaître, alors qu'il est éternel. Nous sommes encore trompés, car nos sens ne peuvent pas expérimenter le domaine microscopique.

* *

Il semble que les objets soient distinguables, bien que les propriétés statistiques de leurs composants montrent qu'il n'en est rien. Nous sommes trompés parce que nous vivons à des énergies faibles.

* *

La matière semble continue, bien qu'elle ne le soit pas. Nous sommes trompés à cause des limites de nos sens.

* *

Le mouvement semble déterministe au sens classique du terme, alors qu'il est aléatoire. Nous sommes à nouveau trompés parce que nous sommes macroscopiques.

* *

En bref, notre condition humaine nous trompe en permanence. La réponse à la question de l'entête de cette section est que la physique classique est comme la magie et que les astuces sont révélées par la théorie quantique. C'est là son principal attrait.

La théorie quantique est exacte, mais elle peut faire mieux

Nous pouvons résumer cette partie de notre aventure avec une déclaration toute simple:

▷ La physique quantique est la description de la matière et du rayonnement

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sans le concept de l'infiniment petit.

Tout changement dans la nature (en fait, toute chose) est décrit par des quantités *qui ne sont pas infiniment petites* et par-dessus tout, par le plus petit changement possible dans la nature, le quantum d'action $\hbar = 1,054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js.

Toutes les expériences, sans exception, montrent que le quantum d'action $\hbar$ est le plus petit changement observable. La description de la nature avec le quantum d'action est donc *exacte* et *définitive*. L'action mesurable minimale $\hbar$, tout comme la vitesse maximale de l'énergie c, est une propriété fondamentale de la nature. On pourrait tout aussi bien les appeler toutes les deux des *vérités fondamentales*.

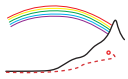
Puisque la théorie quantique découle logiquement et entièrement de l'action mesurable minimale $\hbar$, le moyen le plus simple (qui est en fait le seul) pour réfuter la théorie quantique est de trouver une observation qui contredise la valeur du changement minimale $\hbar$. Essayez!

Défi 160 f

Bien que nous ayons déduit une propriété fondamentale de la nature, lorsque nous retournons au tout début de notre exploration de la théorie quantique, nous ne pouvons cacher une certaine déception: nous savons que la physique classique ne peut pas expliquer la vie. En recherchant les détails du mouvement microscopique, nous avons rencontré de si nombreux aspects intéressants que nous n'avons *pas encore* réussi à expliquer la vie. Par exemple, nous savons ce qui détermine la vitesse des électrons dans les atomes, mais nous ne savons pas ce qui détermine la vitesse de course d'un athlète. En fait, nous n'avons même pas discuté des propriétés d'un solide ou d'un liquide, et encore moins de celles de structures plus complexes telles que les êtres vivants.

Page 16

Autrement dit, après cette introduction sur la théorie quantique, il nous reste encore à relier les processus quantiques à notre monde quotidien. C'est pourquoi le prochain volume portera sur l'exploration du mouvement des êtres vivants, mais aussi des mouvements qui règnent à l'intérieur des êtres vivants, ainsi qu'à l'intérieur de toutes les formes de matières, depuis les solides jusqu'aux étoiles, en utilisant le quantum d'action comme fondement. Après cela, nous explorerons le mouvement de l'espace vide.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Annexe A

Les unités, les mesures et les constantes

Mesurer consiste à comparer avec un étalon de référence. Les étalons sont basés sur des unités. De nombreux systèmes d'unités différents ont été utilisées à travers le monde. La plupart de ces étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Un tel pouvoir peut être utilisé abusivement: c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même par le passé. La solution est identique dans les deux cas: mettre en place un étalon indépendant et général. Concernant les unités de mesure, c'est ce qui s'est passé au XVIIIe siècle lorsqu'un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. Leur but était d'éviter les abus de la part d'institutions autoritaires, d'éliminer les problèmes relatifs à des étalons différents, changeants et non reproductibles, et (ce n'est pas une blague) de simplifier et de rendre plus équitable le recouvrement des impôts. Cet ensemble d'unités s'appelle le *Système international d'unités*, abrégé en *SI*, et il est défini par un traité international, la «Convention du Mètre». Les unités sont régies par une organisation internationale, la «Conférence générale des poids et mesures» (CGPM), ainsi que par ses organisations filles, la «Commission internationale des poids et mesures» et le «Bureau international des poids et mesures» (BIPM). Toutes ont vu le jour peu de temps avant la Révolution française.

Ref. 151

Les unités du SI

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*. Leurs définitions simplifiées sont données ci-dessous, avec les dates de leur formulation et quelques commentaires:

- «La *seconde*, symbole s, est l'unité de durée du SI. Elle est définie comme étant la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.» (1967) La définition de 2019 est équivalente, mais beaucoup moins claire.*
- «Le *mètre*, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini comme étant la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.» (1983) La définition de 2019 est équivalente, mais beaucoup moins claire.*
- «Le *kilogramme*, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique de la constante de Planck, h, fixée à $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en $\mathrm{J \cdot s}$, unité égale à $\mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}}$.» (2019)*
- «L'*ampère*, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire, e, égale à $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ lorsqu'elle est

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

exprimée en C, unité égale à A · s.» (2019)* Cette définition est équivalente à: un ampère correspond à $6,241\,509\,074... \cdot 10^{18}$ charges élémentaires par seconde.

- «Le *kelvin*, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k, égale à $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en $J \cdot K^{-1}$, unité égale à $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$.» (2019)*
- «La *mole*, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ entités élémentaires.» (2019)*
- «La *candela*, symbole cd, est l'unité d'intensité lumineuse du SI. Elle est définie comme étant l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.» (1979). La définition de 2019 est équivalente, mais beaucoup moins claire.*

On notera que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un exemple de mouvement standard, à savoir celui de la lumière. Autrement dit, la Conférence générale des poids et mesures insiste aussi sur le fait que l'observation du mouvement est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. *Le mouvement est le fondement de toute observation et de toute mesure*. Par ailleurs, l'utilisation de la lumière pour les définitions avait déjà été proposée en 1827 par Jaques Babinet.**

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités se définissent par des multiplications et des divisions. Par conséquent, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes:

- Les unités du SI forment un système ayant une *précision à la pointe de la technologie*: toutes les unités sont définies avec une précision qui est meilleure que la précision des mesures couramment pratiquées. De plus, la précision des définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle pour la définition de la seconde est autour de 10^{-14}, elle est environ de 10^{-10} pour le mètre, environ de 10^{-9} pour le kilogramme, de 10^{-7} pour l'ampère, de moins de 10^{-6} pour la mole, de 10^{-6} pour le kelvin et de 10^{-3} pour la candela.
- Les unités du SI forment un système *absolu*: toutes les unités sont définies de façon à pouvoir être reproduites dans n'importe quel laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une grande précision. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui établit les étalons. En fait, les unités du SI sont aujourd'hui aussi proches que possible des unités naturelles de Planck, qui sont présentées plus loin. En pratique, le SI est aujourd'hui un standard international définissant les valeurs numériques des sept constantes $\Delta\nu_{Cs}$, c, $\hbar$, e, k, N_A et K_{cd}. Après plus de 200 ans de discussions, la CGPM n'a plus grand-chose à faire.

* Les symboles des sept unités sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Les définitions officielles complètes se trouvent sur www.bipm.org. Pour plus de détails concernant les niveaux de l'atome de césium, vous pouvez consulter un livre de physique atomique. L'échelle de température Celsius θ est définie par $\theta/°C = T/K - 273,15$. Notez la petite différence avec le nombre figurant dans la définition du kelvin. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555, 5 nm, c.-à-d. à la couleur verte, proche de la longueur d'onde à laquelle l'œil est le plus sensible.

Ref. 152

** Jaques Babinet (1794 – 1874), physicien français qui publia d'importants travaux en optique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▪ Les unités du SI forment un système *pratique*: les unités de base sont des quantités dont les grandeurs nous sont familières. Les unités couramment utilisées ont des noms et des abréviations standard. La liste complète comprend les sept unités de base que l'on vient de décrire, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Le SI a deux unités *supplémentaires*: l'unité d'angle (dans le plan) est le *radian* (rad), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon; l'unité d'angle solide est le *stéradian* (sr), défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon.

Les unités *dérivées* ayant un nom particulier sont, dans leur désignation officielle française, c.-à-d. sans lettres majuscules:

Nom	Abréviation	Nom	Abréviation
hertz	$Hz = 1/s$	newton	$N = kg\,m/s^2$
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/m\,s^2$	joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$	coulomb	$C = As$
volt	$V = kg\,m^2/As^3$	farad	$F = As/V = A^2s^4/kg\,m^2$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/A^2s^3$	siemens	$S = 1/\Omega$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/As^2$	tesla	$T = Wb/m^2 = kg/As^2 = kg/Cs$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/A^2s^2$	degré Celsius	°C (voir la définition du kelvin)
lumen	$lm = cd\,sr$	lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
becquerel	$Bq = 1/s$	gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$	katal	$kat = mol/s$

On notera que dans toutes les définitions des unités, le kilogramme n'apparaît qu'à la puissance 1, 0 ou −1. Pouvez-vous essayer d'en formuler la raison? Défi 161 e

Les unités *admises*, ne faisant pas partie du SI, sont: la *minute*, l'*heure* et le *jour* (pour les durées), le *degré* $1° = \pi/180$ rad, la *minute* $1' = \pi/10\,800$ rad, la *seconde* $1'' = \pi/648\,000$ rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. Il faut éviter toutes les autres unités.

Toutes les unités du SI sont rendues plus pratiques par l'introduction de noms et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que l'on nomme *préfixes*:*

* Certains de ces noms ont été inventés (yocto pour que sa sonorité ressemble au latin *octo* «huit»; zepto pour que sa sonorité ressemble au latin *septem*; yotta et zetta pour que leur sonorité ressemble à celle des deux précédents; exa et peta pour que leur sonorité ressemble aux mots grecs ἑξάκις et πεντάκις pour «six fois» et «cinq fois»; les noms qui ne sont pas officiels pour que leur sonorité ressemble aux mots grecs signifiant neuf, dix, onze et douze). Certains proviennent du danois/norvégien (atto de *atten* «dix-huit»; femto de *femten* «quinze»). Certains proviennent du latin (de *mille*; de *centum* «cent»; de *decem* «dix»; de *nanus* «nain»). Certains dérivent de l'italien (de *piccolo* «petit»). Certains sont grecs (micro vient de μικρός «petit»; deca/deka de δέκα «dix»; hecto de ἑκατόν «cent»; kilo de χίλιοι «mille»; mega de μέγας «gros»; giga de γίγας «géant»; tera de τέρας «monstre»). Interprétez: j'étais pris dans un tel embouteillage qu'il m'a fallu un microsiècle pour avancer d'un picoparsec et que la consommation de carburant de ma voiture a été de deux dixièmes d'un millimètre carré. Défi 162 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Puissance	Nom		Puissance	Nom		Puissance	Nom		Puissance	Nom	
10^{1}	deca	da	10^{-1}	deci	d	10^{18}	Exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{2}	hecto	h	10^{-2}	centi	c	10^{21}	Zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	milli	m	10^{24}	Yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
10^{6}	Mega	M	10^{-6}	micro	μ	non officiel:			Ref. 153		
10^{9}	Giga	G	10^{-9}	nano	n	10^{27}	Xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{12}	Tera	T	10^{-12}	pico	p	10^{30}	Wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{15}	Peta	P	10^{-15}	femto	f	10^{33}	Vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
						10^{36}	Udekta	U	10^{-36}	udeko	u

- Les unités du SI forment un système *complet*: elles couvrent de façon systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles établissent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.
- Les unités du SI forment un système *universel*: elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, de l'industrie, du commerce, à la maison, pour l'éducation et pour la recherche. Elles pourraient même être utilisées par des civilisations extraterrestres s'il en existait.
- Les unités du SI forment un système *auto-cohérent*: le produit ou le quotient de deux unités du SI est lui-même une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, «SI» par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne forment pas l'unique ensemble possible qui puisse satisfaire toutes ces exigences, mais elles forment le seul système existant qui le fasse.*

La signification de la mesure

Toute mesure est une comparaison avec un étalon de référence. Donc, toute mesure nécessite de la *matière* pour réaliser l'étalon (même pour un étalon de vitesse) et du *rayonnement* pour accomplir la comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils puissent être distinctement dissociés l'un de l'autre.

Défi 163 f

Chaque mesure est une comparaison. Mesurer implique donc que l'espace et le temps existent, et qu'ils diffèrent l'un de l'autre.

Chaque mesure produit un résultat. Donc, chaque mesure implique un *stockage* du résultat. Le processus au moyen duquel on fait la mesure implique donc que la situation

* En plus des unités internationales, il existe aussi des unités *régionales*. La plupart des unités régionales qui sont encore en usage sont d'origine romaine. Le mile vient de *milia passum*, qui valait à l'époque mille (doubles) enjambées de 1480 mm chacune. Le mille nautique, qui valait jadis une minute d'arc de la surface de la Terre, est aujourd'hui défini comme étant exactement 1852 m. Le pouce («inch» en anglais [N.d.T.]) vient de *uncia*/*onzia* (un douzième, aujourd'hui d'un pied). La livre (dont la traduction anglaise «pound» vient de *pondere* «peser») est utilisée comme la traduction de *libra* (balance) qui est à l'origine de son abréviation lb. Même l'habitude de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Ces unités, ainsi que bien d'autres toutes aussi cocasses (tel que le système dans lequel toutes les unités commencent par un «f» et qui utilise le furlong par quinzaine de jours comme unité de vitesse), sont maintenant définies de façon officielle comme des multiples des unités du SI.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

avant la mesure et la situation après la mesure peuvent être distinguées. Autrement dit, chaque mesure est un processus *irréversible*.

Chaque mesure est un processus. Donc, chaque mesure nécessite une certaine quantité de temps et une certaine quantité d'espace.

Toutes ces propriétés de la mesure sont simples mais importantes. Méfiez-vous de quiconque qui les ignorerait.

Les unités naturelles de Planck

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens utilisent souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations simples. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont liées. En physique microscopique, on utilise fréquemment le système des *unités naturelles de Planck*. Elles sont définies en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont ainsi définies à partir de combinaisons des constantes fondamentales. Celles qui correspondent aux unités fondamentales du SI sont données dans le Tableau 10.* Le tableau permet également de convertir les équations écrites avec les unités naturelles en leur unité équivalent du SI: il suffit de remplacer X par X/X_{Pl} pour chaque grandeur.

Défi 164 f

TABLEAU 10 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

Nom	Définition	Valeur
Les unités de base		
la longueur de Planck	$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,616\,0(12) \cdot 10^{-35}$ m
le temps de Planck	$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$= 5,390\,6(40) \cdot 10^{-44}$ s
la masse de Planck	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	$= 21,767(16)$ µg
le courant électrique de Planck	$I_{\text{Pl}} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	$= 3,479\,3(22) \cdot 10^{25}$ A
la température de Planck	$T_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	$= 1,417\,1(91) \cdot 10^{32}$ K
Les unités triviales		
la vitesse de Planck	$v_{\text{Pl}} = c$	$= 0,3$ Gm/s
le moment cinétique de Planck	$L_{\text{Pl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js
l'action de Planck	$S_{\text{aPl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js
l'entropie de Planck	$S_{\text{ePl}} = k$	$= 13,8$ yJ/K
Les unités composées		
la masse volumique de Planck	$\rho_{\text{Pl}} = c^5/G^2\hbar$	$= 5,2 \cdot 10^{96}$ kg/m^3

* Les unités naturelles x_{Pl} qui sont données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c.-à-d. celles qui sont définies en utilisant la constante $\hbar$, et non, comme Planck le fit initialement, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités de l'électromagnétisme peuvent également se définir à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\varepsilon_0$ dans les expressions: par exemple, en utilisant $4\pi\varepsilon_0\alpha$ (avec la *constante de structure fine* α) on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour les explications à propos des nombres entre parenthèses, voir plus loin dans le texte.

Page 222

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 10 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck (continuation).

NOM	DÉFINITION	VALEUR
l'énergie de Planck	$E_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G}$	$= 2,0\,\mathrm{GJ} = 1,2 \cdot 10^{28}\,\mathrm{eV}$
la quantité de mouvement de Planck	$p_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar c^3/G}$	$= 6,5\,\mathrm{Ns}$
la puissance de Planck	$P_{\mathrm{Pl}} = c^5/G$	$= 3,6 \cdot 10^{52}\,\mathrm{W}$
la force de Planck	$F_{\mathrm{Pl}} = c^4/G$	$= 1,2 \cdot 10^{44}\,\mathrm{N}$
la pression de Planck	$p_{\mathrm{Pl}} = c^7/G\hbar$	$= 4,6 \cdot 10^{113}\,\mathrm{Pa}$
l'accélération de Planck	$a_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^7/\hbar G}$	$= 5,6 \cdot 10^{51}\,\mathrm{m/s^2}$
la fréquence de Planck	$f_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^5/\hbar G}$	$= 1,9 \cdot 10^{43}\,\mathrm{Hz}$
la charge électrique de Planck	$q_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	$= 1,9\,\mathrm{aC} = 11,7\,\mathrm{e}$
la tension électrique de Planck	$U_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	$= 1,0 \cdot 10^{27}\,\mathrm{V}$
la résistance électrique de Planck	$R_{\mathrm{Pl}} = 1/4\pi\varepsilon_0 c$	$= 30,0\,\Omega$
la capacité électrique de Planck	$C_{\mathrm{Pl}} = 4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,8 \cdot 10^{-45}\,\mathrm{F}$
l'inductance électrique de Planck	$L_{\mathrm{Pl}} = (1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	$= 1,6 \cdot 10^{-42}\,\mathrm{H}$
le champ électrique de Planck	$E_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	$= 6,5 \cdot 10^{61}\,\mathrm{V/m}$
la densité de flux magnétique de Planck	$B_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	$= 2,2 \cdot 10^{53}\,\mathrm{T}$

Les unités naturelles sont importantes pour une autre raison: chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée «d'infiniment petite (ou grande)», l'expression correct devrait être «aussi petite (ou grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante». Comme expliqué tout au long de ce texte, et tout particulièrement dans la dernière partie, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrême de l'observable correspondante (certaines comme limite supérieure et d'autres comme limite inférieure). Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement répandus. La valeur extrême exacte pour chacune des observables de la nature est obtenue lorsque G est substitué par $4G$ et $4\pi\varepsilon_0$ par $4\pi\varepsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrêmes, ou *unités de Planck corrigées*, sont les véritables *unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrêmes uniquement pour quelques grandeurs extensives. (Pouvez-vous trouver lesquelles?)

Vol. VI, page 37

Défi 165 e

LES AUTRES SYSTÈMES D'UNITÉS

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est de calculer les intensités de toutes les interactions. Par conséquent, il n'est pas pratique de fixer la constante de gravitation G à la valeur 1, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies, bien souvent, fixent uniquement $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$,* laissant seulement la constante de gravitation G dans

* D'autres définitions pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entre autres, au système d'unités gaussiennes qui sont souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités Heaviside-Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

Ref. 154

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'équation.

Dans ce système, il n'existe qu'une seule unité fondamentale, mais son choix est libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité fondamentale, car elle est l'archétype d'une grandeur mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont ainsi liées par les relations suivantes:

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}]\,, \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T]\,, \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha]\,, \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned} \tag{116}$$

où on écrit $[x]$ pour représenter l'unité de la grandeur x. Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système.*

Souvent, afin d'avoir une perception des énergies nécessaires pour observer un effet que l'on est en train d'étudier, une énergie standard est choisie comme unité fondamentale. En physique des particules, l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* eV, définie comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel électrique de 1 volt («protonvolt» serait un nom plus approprié). Ainsi, nous avons $1\,\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$, ou approximativement

$$1\,\text{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\text{aJ} \tag{117}$$

qu'il est facile de mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ conduit à $G = 6,9 \cdot 10^{-57}\,\text{eV}^{-2}$ et permet également d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la longueur, avec les correspondances respectives
Défi 166 f $1\,\text{eV} \equiv 1,8 \cdot 10^{-36}\,\text{kg} \equiv 5,4 \cdot 10^{-28}\,\text{Ns} \equiv 242\,\text{THz} \equiv 11,6\,\text{kK}$ et $1\,\text{eV}^{-1} \equiv 4,1\,\text{fs} \equiv 1,2\,\mu\text{m}$.

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations suivantes sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20 °C ou 293 K, correspond à une énergie cinétique par particule de 0,025 eV ou 4,0 zJ. La plus grande énergie que l'on ait mesurée jusqu'à présent pour une seule particule appartient à un rayon cosmique
Ref. 155 d'une énergie de $3 \cdot 10^{20}$ eV ou 48 J. Ici-bas sur Terre, on a construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des antiélectrons, et un autre, capable de produire des protons d'une énergie de 14 TeV ou 2,2 µJ. Tous les deux appartiennent au CERN à Genève et ont une circonférence de 27 km.

* Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique, B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension électrique, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance électrique, P la puissance et G la constante de gravitation.

La page internet www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités les unes vers les autres.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_S = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer les masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la *même* dimension, et $\hbar$ a la dimension d'une surface.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK, dans un sys-
Ref. 156 tème de noyau de rhodium maintenu au sein d'un dispositif de refroidissement spécial. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est aussi la plus petite jamais mesurée: elle correspond à 24 feV ou $3,8\,\mathrm{vJ} = 3,8 \cdot 10^{-33}$ J. Pour des particules isolées, le record semble être détenu par des neutrons: des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm.

Curiosités et défis amusants concernant les unités

La longueur de Planck est approximativement la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à un pas confortable ($m = 80\,\mathrm{kg}$, $v = 0,5\,\mathrm{m/s}$). Ce mouve-
Ref. 157 ment est par conséquent appelé à juste titre la «promenade de Planck».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain âgé d'environ dix jours.

* *

Les grandeurs de la nature mesurées avec le plus de précision sont les fréquences de
Ref. 158 certains pulsars milliseconde, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites et la constante de Rydberg de l'atome d'*hydrogène*. Elles peuvent toutes être mesurées avec autant de précision que la définition de la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur de raie spectrale finie, ce qui restreint la précision accessible: cette limite est d'environ 14 chiffres significatifs.

* *

L'horloge la plus précise jamais fabriquée, en utilisant des micro-ondes, possède une
Ref. 159 stabilité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 était d'environ 10^{-15}, mais des valeurs avoisinant les 10^{-17}
Ref. 160 semblent technologiquement accessibles. La précision des horloges est limitée par le bruit de fond parasite pour les durées de mesure courtes, et par des biais, c.-à-d. par des effets systématiques, pour les durées de mesure longues. La région pour laquelle la stabilité est la plus élevée dépend du type d'horloge. Elle se situe généralement entre 1 ms pour les horloges optiques et 5000 s pour les masers. Les pulsars constituent le seul type d'horloges pour lequel cette région n'est pas encore connue. Elle se situe vraisemblablement à plus de 20 ans, la durée qui s'est écoulée depuis leur découverte et l'instant où ces lignes ont été écrites.

* *

Les durées les plus courtes qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules «élémentaires». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été mesurée
Ref. 161 à moins de 10^{-23} s. De telles durées sont mesurées à l'aide d'une chambre à bulles, au sein de laquelle la trace laissée par la particule est photographiée. Pouvez-vous estimer
Défi 167 e quelle est la longueur de cette trace? (C'est une question piège: si votre longueur ne peut

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} ans, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, plus de 10^{32} ans. Ces durées sont donc bien plus grandes que l'âge de l'univers, estimé à quatorze mille millions d'années. Ref. 162

* *

Les variations des grandeurs sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube, il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont aujourd'hui en train de se faire surpasser par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquences de 10^{-21} ont déjà été construits, et ils sont toujours en cours de perfectionnement. Ref. 163 Ref. 164

La précision et l'exactitude des mesures

Les mesures sont à la base de la physique. Toute mesure comporte une *erreur*. Les erreurs sont dues à un manque de précision ou à un manque d'exactitude. La *précision* exprime de degré de reproductibilité d'un résultat lorsque la mesure est réitérée. L'*exactitude* exprime le degré de correspondance entre la mesure et la valeur réelle.

Le manque de précision est dû à des erreurs accidentelles ou *aléatoires*. La meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer leur *écart type*, généralement noté σ. Il est défini par

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \,, \tag{118}$$

où $\bar{x}$ représente la moyenne des mesures x_i. (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule plutôt que n?) Défi 168 e

Pour la plupart des expériences, lorsque l'on augmente le nombre de mesures, la distribution des valeurs obtenues tend vers une loi normale, que l'on appelle également la loi de Gauss*. Cette distribution, que l'on a reproduite sur la Figure 85, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \,. \tag{119}$$

Le carré de l'écart type σ^2 est également appelé la *variance*. Pour une distribution gaussienne des valeurs de mesures, $2,35\sigma$ est la largeur à mi-hauteur. Défi 169 f

Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*. En général, ces dernières ne peuvent être que des estimations, qui sont souvent ajoutée aux erreurs aléatoires

* La loi de Gauss est aussi appelée loi gaussienne, ou encore loi de Laplace-Gauss [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

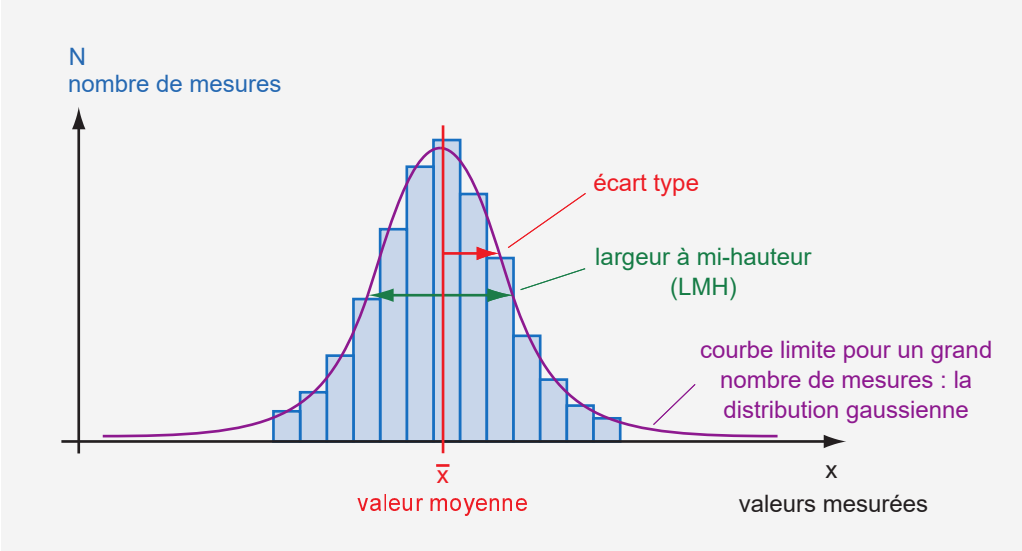


FIGURE 85 Une expérience de précision et sa distribution de mesures. La précision est élevée si la largeur de la distribution est étroite. L'exactitude est élevée si le centre de la distribution est en accord avec la valeur réelle.

Ref. 165 pour fournir une *erreur!expérimentale totale*, que l'on appelle parfois l'*incertitude!totale*. L'*erreur!relative* (l'incertitude relative) est le rapport entre l'erreur et la valeur mesurée.

Par exemple, une mesure faite par des professionnels donnera un résultat sous la forme 0, 312(6) m. Le nombre entre parenthèse est l'écart type σ, exprimé dans la même unité que la dernière décimale. Comme ci-dessus, on suppose une distribution gaussienne des résultats des mesures. Par conséquent, une valeur de 0, 312(6) m implique
Défi 170 f que l'on s'attend à ce que la valeur réelle se trouve

— à moins de 1σ avec une probabilité de 68,3 %, ce qui correspond (pour cet exemple) à $0,312 \pm 0,006$ m;
— à moins de 2σ avec une probabilité de 95,4 %, ce qui correspond à $0,312 \pm 0,012$ m;
— à moins de 3σ avec une probabilité de 99,73 %, ce qui correspond à $0,312 \pm 0,018$ m;
— à moins de 4σ avec une probabilité de 99,9937 %, ce qui correspond à $0,312 \pm 0,024$ m;
— à moins de 5σ avec une probabilité de 99,999 943 %, ce qui correspond à $0,312 \pm 0,030$ m;
— à moins de 6σ avec une probabilité de 99,999 999 80 %, ce qui correspond à $0,312 \pm 0,036$ m;
— à moins de 7σ avec une probabilité de 99,999 999 999 74 %, ce qui correspond à $0,312 \pm 0,041$ m.

Défi 171 e (Est-ce que les derniers nombres vous paraissent sensés?)

Notez que l'écart type n'est donné qu'avec un seul chiffre significatif. Il faudrait être un expert mondial pour en donner deux, et un demeuré pour en utiliser plus. Si aucun écart type n'est fourni, on le supposera égale à (1). Par conséquent, parmi les profession-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nels, 1 km et 1000 m ne sont *pas* les mêmes longueurs!

Que se passe-t-il pour les erreurs lorsque deux valeurs de mesure A et B sont ajoutées ou soustraites? Si toutes les mesures sont indépendantes (non corrélées) l'écart type de la somme *et* celui de la différence sont tous les deux donnés par $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$. Pour le produit ou pour le rapport entre les valeurs C et D de deux valeurs mesurées et non corrélées, le résultat est $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$ où les termes ρ sont les écarts types *relatifs*.

Supposez que vous mesuriez qu'un objet se déplace de 1 m en 3 s. Quelle sera la valeur mesurée pour la vitesse? Défi 172 e

Les limites de la précision

Quelles sont les limites de l'exactitude et de la précision? Il n'existe aucun moyen, même dans le principe, pour mesurer une longueur x avec une *précision* de plus 61 chiffres significatifs environ, car dans la nature, le rapport entre la plus petite et la plus grande longueur mesurable est $\Delta x/x > l_{\text{Pl}}/d_{\text{horizon}} = 10^{-61}$. (Ce rapport est-il également valide pour les forces et pour les volumes?) Dans la dernière partie de ce texte, l'étude des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique. Défi 173 f Vol. VI, page 94

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus rigoureuses. Il n'est pas possible d'imaginer une machine qui puisse mesurer des quantités avec une précision meilleure que celle obtenue en mesurant le diamètre de la Terre avec une précision égale à la plus petite longueur jamais mesurée, environ 10^{-19} m. Cela fait environ 26 chiffres significatifs. En utilisant la limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1000 m on obtient une limite de 22 chiffres significatifs. Si, comme nous l'avons prédit ci-dessus, les mesures de durées permettent réellement d'obtenir 17 chiffres significatifs, alors, elles s'approchent de la limite pratique, car mise à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire: le coût. En effet, un chiffre significatif supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent un chiffre supplémentaire pour le coût des équipements.

Les constantes physiques

En physique, les observations les plus générales sont déduites à partir d'observations plus fondamentales. Par conséquent, de nombreuses mesures peuvent être déduites à partir de mesures plus fondamentales. Les mesures les plus fondamentales sont celles des constantes physiques.

Les tableaux qui suivent fournissent les meilleures valeurs du monde pour les constantes physiques et les propriétés des particules les plus importantes (en unités SI ainsi que dans quelques autres unités courantes) telles qu'on les trouve dans les références officielles. Les valeurs sont les moyennes mondiales des meilleurs mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les erreurs expérimentales, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type sur les dernières décimales. En fait, derrière chaque nombre des tableaux suivants, se cache une longue histoire qu'il serait digne de raconter, mais pour lesquelles nous n'avons pas assez de place ici. Ref. 166 Ref. 167

En principe, *toutes* les propriétés quantitatives de la matière peuvent se calculer à l'aide de la théorie quantique (plus précisément à l'aide des équations du modèle standard des particules) et d'un ensemble de constantes fondamentales qui sont données Vol. V, page 261

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

dans les tableaux suivants. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques de n'importe quel matériau peuvent être prédites, en principe, de cette façon.

TABLEAU 11 Constantes physiques fondamentales.

Quantité	Symbole	Valeur en unité SI	Incert.[a]
Constantes qui définissent les unités de mesures du SI			
Vitesse de la lumière dans le vide [c]	c	299 792 458 m/s	0
Constante de Planck initiale [c]	h	$6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Js	0
Constante de Planck réduite ou quantum d'action	$\hbar$	$1,054\,571\,817 ... \cdot 10^{-34}$ Js	0
Charge du positon [c]	e	0,160 217 6634 aC	0
Constante de Boltzmann [c]	k	$1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K	0
Nombre d'Avogadro	N_{A}	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol	0
Constantes qui *devraient* définir les unités de mesures du SI			
Constante gravitationnelle	G	$6,674\,30(15) \cdot 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2/kg^2}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Autres constantes fondamentales			
Nombre de dimensions de l'espace-temps		3 + 1	0 [b]
Constante de structure fine [d] ou	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	1/137,035 999 084(21)	$1,5 \cdot 10^{-10}$
constante de couplage e.m.	$= g_{\mathrm{em}}(m_{\mathrm{e}}^2 c^2)$	= 0,007 297 352 5693(11)	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Constante de couplage de Fermi [d] ou	$G_{\mathrm{F}}/(\hbar c)^3$	$1,166\,3787(6) \cdot 10^{-5}\ \mathrm{GeV^{-2}}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$
constante de couplage faible	$\alpha_{\mathrm{w}}(M_{\mathrm{Z}}) = g_{\mathrm{w}}^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
Constante de couplage fort [d]	$\alpha_{\mathrm{s}}(M_{\mathrm{Z}}) = g_{\mathrm{s}}^2/4\pi$	0,1179(10)	$8,5 \cdot 10^{-3}$
Angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_{\mathrm{W}}(\overline{MS})$	0,231 22(4)	$1,7 \cdot 10^{-4}$
	$\sin^2\theta_{\mathrm{W}}$ (enveloppe) $= 1 - (m_{\mathrm{W}}/m_{\mathrm{Z}})^2$	0,222 90(30)	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Matrice CKM de transformation des quarks	$\lvert V\rvert$	$\begin{pmatrix} 0,97383(24) & 0,2272(10) & 0,00396(9) \\ 0,2271(10) & 0,97296(24) & 0,04221(80) \\ 0,00814(64) & 0,04161(78) & 0,999100(34) \end{pmatrix}$	
Invariant de Jarlskog	J	$3,08(18) \cdot 10^{-5}$	
Matrice PMNS de transformation des neutrinos	$\lvert P\rvert$	$\begin{pmatrix} 0,82(2) & 0,55(4) & 0,150(7) \\ 0,37(13) & 0,57(11) & 0,71(7) \\ 0,41(13) & 0,59(10) & 0,69(7) \end{pmatrix}$	
Masse de l'électron	m_{e}	$9,109\,383\,7015(28) \cdot 10^{-31}$ kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
		$5,485\,799\,090\,65(16) \cdot 10^{-4}$ u	$2,9 \cdot 10^{-11}$
		0,510 998 950 00(15) MeV	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Masse du muon	m_{μ}	$1,883\,531\,627(42) \cdot 10^{-28}$ kg	$2,2 \cdot 10^{-8}$
		105,658 3755(23) MeV	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Masse du tau	m_{τ}	$1,776\,82(12)\ \mathrm{GeV}/c^2$	$6,8 \cdot 10^{-5}$
Masse du neutrino électronique	$m_{\nu_{\mathrm{e}}}$	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Masse du neutrino muonique	$m_{\nu_{\mu}}$	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Masse du neutrino tauique	$m_{\nu_{\tau}}$	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 11 Constantes physiques fondamentales (continuation).

Quantité	Symbole	Valeur en unité SI	Incert.[a]
Masse du quark haut (up)	u	$21,6(+0,49/-0,26)\,\mathrm{MeV}/c^2$	
Masse du quark bas (down)	d	$4,67(+0,48/-0,17)\,\mathrm{MeV}/c^2$	
Masse du quark étrange (strange)	s	$93(+11/-5)\,\mathrm{MeV}/c^2$	
Masse du quark charme (charm)	c	$1,27(2)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du quark dessous (bottom)	b	$4,18(3)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du quark dessus (top)	t	$172,9(0,4)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du photon	γ	$< 2 \cdot 10^{-54}\,\mathrm{kg}$	
Masse du boson W	$W^{\pm}$	$80,379(12)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du boson Z	Z^0	$91,1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du boson de Higgs	H	$125,10(14)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du gluon	$g_{1\ldots8}$	$\approx 0\,\mathrm{MeV}/c^2$	

a. Incertitude: écart type des erreurs de mesures.
b. Mesurées seulement de 10^{-19} m à 10^{26} m.
c. Constante servant de définition.
d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion-énergie, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion-énergie de $Q^2 = m_e^2 c^2$, qui est la plus petite valeur possible. Pour des transferts d'impulsion-énergie plus élevés, elle possède une valeur plus grande, par exemple, $g_{\mathrm{em}}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. En revanche, la constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs plus faibles aux transferts d'impulsion-énergie plus élevés. Par exemple, $\alpha_s(34\,\mathrm{GeV}) = 0,14(2)$.

Page 131

Pourquoi toutes ces constantes fondamentales ont-elles les valeurs qu'elles ont? Pour chaque constante fondamentale *ayant une dimension*, tel que le quantum d'action $\hbar$, la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1,054 \cdot 10^{-34}$ Js à cause de la définition SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante *dimensionnelle* n'est ni plus grande ni plus petite, nécessite donc toujours de comprendre l'origine de certains nombres *sans dimension* qui fournissent le rapport entre la constante et l'*unité naturelle* correspondante, qui est elle-même définie à l'aide de c, G, k, N_A et $\hbar$. Plus de détails, ainsi que les valeurs des unités naturelles, sont donnés dans la section dédiée. En d'autres termes, comprendre les tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, la durée des processus moléculaires et atomiques, ou encore la masse des noyaux ou des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clef pour la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et donc de toutes les constantes sans dimension. Cette quête, y compris la compréhension de la constante de structure fine α elle-même, ne s'achèvera que dans le volume final de notre aventure.

Page 237

Les constantes fondamentales conduisent aux observations, utiles et de grande précision, suivantes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 12 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR EN UNITÉ SI	INCERT.
Perméabilité magnétique du vide	μ_0	1, 256 637 062 12(19) µH/m	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Permittivité diélectrique du vide	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8, 854 187 8128(13) pF/m	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376, 730 313 668(57) Ω	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Nombre de Loschmidt à 273, 15 K et 101 325 Pa	N_L	$2,686\,780\,111... \cdot 10^{25}$ 1/m^3	0
Constante de Faraday	$F = N_A e$	96 485, 332 12... C/mol	0
Constante universelle des gaz parfaits	$R = N_A k$	8, 314 462 618... J/(mol K)	0
Volume molaire d'un gaz parfait à 273, 15 K et 101 325 Pa	$V = RT/p$	22, 413 969 54... l/mol	0
Constante de Rydberg [a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	10 973 731, 568 160(21) m^{-1}	$1,9 \cdot 10^{-12}$
Quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77, 480 917 29... µS	0
Quantum de flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2, 067 833 848... fWb	0
Constante de Josephson	$2e/h$	483, 597 8484... THz/V	0
Constante de Von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812, 807 45... Ω	0
Magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9, 274 010 0783(28) yJ/T	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 m_e c^2$	2, 817 940 3262(13) fm	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Longueur d'onde de Compton de l'électron	$\lambda_C = h/m_e c$	2, 426 310 238 67(73) pm	$3,0 \cdot 10^{-10}$
	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0, 386 159 267 96(12) pm	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Rayon de Bohr [a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52, 917 721 0903(80) pm	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Quantum de circulation	$h/2m_e$	3, 636 947 5516(11) cm^2/s	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Charge spécifique du positon	e/m_e	175, 882 001 076(55) GC/kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27, 992 489 872(9) GHz/T	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Moment magnétique de l'électron	μ_e	−9, 284 764 7043(28) yJ/T	$3,0 \cdot 10^{-10}$
	μ_e/μ_B	−1, 001 159 652 181 28(18)	$1,7 \cdot 10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1\,838,281\,971\,88(11) \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^{-11}$
Facteur de Landé de l'électron	g_e	−2, 002 319 304 362 56(35)	$1,7 \cdot 10^{-13}$
Rapport de masse muon-électron	m_μ/m_e	206, 768 2830(46)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Moment magnétique du muon	μ_μ	$-4,490\,448\,30(10) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Facteur de Landé du muon	g_μ	−2, 002 331 8418(13)	$6,3 \cdot 10^{-10}$
Unité de masse atomique	$1\,u = m_{^{12}C}/12$	$1,660\,539\,066\,60(50) \cdot 10^{-27}$ kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Masse du proton	m_p	$1,672\,621\,923\,69(51) \cdot 10^{-27}$ kg	$3,1 \cdot 10^{-10}$
		1, 007 276 466 621(53) u	$5,3 \cdot 10^{-11}$
		938, 272 088 16(29) MeV	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Rapport de masse proton-électron	m_p/m_e	1 836, 152 673 43(11)	$6,0 \cdot 10^{-11}$
Charge spécifique du proton	e/m_p	$9,578\,833\,1560(29) \cdot 10^7$ C/kg	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Longueur d'onde de Compton du proton	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1, 321 409 855 39(40) fm	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5,050\,783\,7461(15) \cdot 10^{-27}$ J/T	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Moment magnétique du proton	μ_p	$1,410\,606\,797\,36(60) \cdot 10^{-26}$ J/T	$4,2 \cdot 10^{-10}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics – Copyright © Christoph Schiller 1990–2025 – All rights reserved – www.motionmountain.net

TABLEAU 12 Constantes physiques dérivées (continuation).

Quantité	Symbole	Valeur en unité SI	Incert.
	μ_p/μ_B	$1,521\,032\,202\,30(46)\cdot10^{-3}$	$3,0\cdot10^{-10}$
	μ_p/μ_N	$2,792\,847\,344\,63(82)$	$2,9\cdot10^{-10}$
Rapport gyromagnétique du proton	$\gamma_p = 2\mu_p/h$	42,577 478 518(18) MHz/T	$4,2\cdot10^{-10}$
Facteur de Landé du proton	g_p	5,585 694 6893(16)	$2,9\cdot10^{-10}$
Masse du neutron	m_n	$1,674\,927\,498\,04(95)\cdot10^{-27}$ kg	$5,7\cdot10^{-10}$
		1,008 664 915 95(43) u	$4,8\cdot10^{-10}$
		939,565 420 52(54) MeV	$5,7\cdot10^{-10}$
Rapport de masse neutron-électron	m_n/m_e	1 838,683 661 73(89)	$4,8\cdot10^{-10}$
Rapport de masse neutron-proton	m_n/m_p	1,001 378 419 31(49)	$4,9\cdot10^{-10}$
Longueur d'onde de Compton du neutron	$\lambda_{C,n} = h/m_nc$	1,319 590 905 81(75) fm	$5,7\cdot10^{-10}$
Moment magnétique du neutron	μ_n	$-0,966\,236\,51(23)\cdot10^{-26}$ J/T	$2,4\cdot10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1,041\,875\,63(25)\cdot10^{-3}$	$2,4\cdot10^{-7}$
	μ_n/μ_N	$-1,913\,042\,73(45)$	$2,4\cdot10^{-7}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = \pi^2k^4/60\hbar^3c^2$	56,703 744 19... nW/m^{2}K^4	0
Constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{max}T$	2,897 771 955... mmK	0
		58,789 257 57... GHz/K	0
Électronvolt	eV	0,160 217 6634... aJ	0
Constante de conversion de bits en entropie	$k\ln 2$	10^{23} bit = 0,956 994... J/K	0
Contenu énergétique du TNT		entre 3,7 et 4,0 MJ/kg	$4\cdot10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Quelques propriétés utiles de notre environnement local sont énumérées dans le tableau qui suit.

TABLEAU 13 Constantes astronomiques.

Quantité	Symbole	Valeur
Année tropique 1900 [a]	a	31 556 925,974 7 s
Année tropique 1994	a	31 556 925,2 s
Jour sidéral moyen	d	$23^h56'4,090\,53''$
Distance moyenne de la Terre au Soleil [b]		149 597 870,691(30) km
Unité astronomique [b]	AU	149 597 870 691 m
Année lumière, basée sur le calendrier Julien [b]	al	9,460 730 472 5808 Pm
Parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
Masse de la Terre	$M_{\oplus}$	$5,973(1)\cdot10^{24}$ kg
Constante de gravitation géocentrique	GM	$3,986\,004\,418(8)\cdot10^{14}$ m^3/s^2
Longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{\oplus} = 2GM/c^2$	8,870 056 078(16) mm
Rayon équatorial de la Terre [c]	$R_{\oplus eq}$	6378,1366(1) km
Rayon polaire de la Terre [c]	$R_{\oplus p}$	6356,752(1) km

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 13 Constantes astronomiques (continuation).

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Distance des pôles à l'équateur [c]		10 001, 966 km (en moyenne)
Aplatissement de la Terre aux pôles [c]	$e_{\oplus}$	1/298, 25642(1)
Densité moyenne de la Terre	$\rho_{\oplus}$	5, 5 Mg/m^3
Âge de la Terre	$T_{\oplus}$	4, 50(4) Ga = 142(2) Ps
Gravité normale de la Terre	g	9, 806 65 m/s^2
Pression atmosphérique standard sur la Terre	p_0	101 325 Pa
Rayon de la Lune	$R_{\leftmoon\,\mathrm{v}}$	1738 km dans la direction de la Terre
Rayon de la Lune	$R_{\leftmoon\,\mathrm{h}}$	1737, 4 km dans les deux autres directions
Masse de la Lune	$M_{\leftmoon}$	7, 35 · 10^{22} kg
Distance moyenne de la Lune [d]	$d_{\leftmoon}$	384 401 km
Distance de la Lune à son périgée [d]		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
Distance de la Lune à son apogée [d]		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
Taille apparente (angulaire) de la Lune [e]		moyenne 0, 5181° = 31, 08′, minimum 0, 49°, maximum 0, 55°
Densité moyenne de la Lune	$\rho_{\leftmoon}$	3, 3 Mg/m^3
Gravité à la surface de la Lune	$g_{\leftmoon}$	1, 62 m/s^2
Pression atmosphérique sur la Lune	$p_{\leftmoon}$	entre 10^{-10} Pa (la nuit) et 10^{-7} Pa (le jour)
Masse de Jupiter	$M_{♃}$	1, 90 · 10^{27} kg
Rayon équatorial de Jupiter	$R_{♃}$	71, 398 Mm
Rayon polaire de Jupiter	$R_{♃}$	67, 1(1) Mm
Distance moyenne de Jupiter au Soleil	$D_{♃}$	778 412 020 km
Gravité à la surface de Jupiter	$g_{♃}$	24, 9 m/s^2
Pression atmosphérique sur Jupiter	$p_{♃}$	entre 20 kPa et 200 kPa
Masse du Soleil	$M_{\odot}$	1, 988 43(3) · 10^{30} kg
Longueur gravitationnelle du Soleil	$2GM_{\odot}/c^2$	2, 953 250 08(5) km
Constante de gravitation héliocentrique	$GM_{\odot}$	132, 712 440 018(8) · 10^{18} m^3/s^2
Luminosité du Soleil	$L_{\odot}$	384, 6 YW
Rayon équatorial du Soleil	$R_{\odot}$	695, 98(7) Mm
Taille apparente (angulaire) du Soleil		0, 53° en moyenne; minimum le 4 juillet (aphélie) 1888″; maximum le 4 janvier (périhélie) 1952″
Densité moyenne du Soleil	$\rho_{\odot}$	1, 4 Mg/m^3
Distance moyenne du Soleil	AU	149 597 870, 691(30) km
Âge du Soleil	$T_{\odot}$	4, 6 Ga
Vitesse du Soleil autour du centre de la galaxie	$v_{\odot\mathrm{g}}$	220(20) km/s
Vitesse du Soleil par rapport au fond cosmique	$v_{\odot\mathrm{b}}$	370, 6(5) km/s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2024 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 13 Constantes astronomiques (continuation).

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Gravité à la surface du Soleil	$g_\odot$	$274\,\mathrm{m/s^2}$
Pression photosphérique basse du Soleil	$p_\odot$	15 kPa
Distance du centre de la Voie lactée		8, 0(5) kpc = 26, 1(1, 6) kal
Âge de la Voie lactée		13, 6 Ga
Taille de la Voie lactée		$\approx 10^{21}$ m or 100 kal
Masse de la Voie lactée		10^{12} masses solaires, $\approx 2 \cdot 10^{42}$ kg
Le plus lointain groupe de galaxies connu	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9,6 \cdot 10^9$ al

a. Constante servant de définition, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Souvenez-vous: π secondes représente environ un nanosiècle.) La valeur en 1990 compte approximativement 0, 7 s de moins, ce qui correspond à un ralentissement d'environ 0, 2 ms/a. (Mais attention: pourquoi?) Il existe même une formule empirique pour estimer la variation de la longueur de l'année au cours du temps.

Défi 174 e

Ref. 168

b. La précision de seulement 30 m sur la distance moyenne entre la Terre et le Soleil est tout à fait surprenante. Elle résulte des durées de propagation moyennes des signaux envoyés par les orbiteurs et les atterrisseurs martiens du programme Viking, qui ont été collectées sur une période de plus de vingt ans. Notez que l'Union astronomique internationale (UAI) fait la distinction entre la distance moyenne entre la Terre et le Soleil et l'*unité astronomique* elle-même. Cette dernière étant définie comme une longueur fixe et exacte. De même, l'*année lumière* est une unité définie comme un nombre exact par l'UAI. Pour plus de détails, consultez www.iau.org/public/measuring.

c. La forme de la Terre est décrite de la façon la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation approfondie de son contexte et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union géodésique et géophysique internationale a révisé les données en 2000. Les rayons et l'aplatissement aux pôles qui sont fournis ici sont ceux correspondant au système de marée dénommé «mean tide system». Ils diffèrent des valeurs du système de marée «zero tide system», ainsi que de celles provenant d'autres systèmes, d'environ 0, 7 m. Les détails dans ce domaine constituent une science en eux-mêmes.

d. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, voir la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html ainsi que les autres pages du même site.

e. Les angles sont définis de la façon suivante: 1 degré = $1^\circ = \pi/180$ rad, 1 (première) minute d'arc = $1' = 1°/60$, 1 seconde (minute) d'arc = $1'' = 1'/60$. Les anciennes unités «troisième minute d'arc» et «quatrième minute d'arc», chacune correspondant à un soixantième de la précédente, ne sont plus utilisées. («Minute» signifiait à l'origine «très petit», ce qui est toujours le cas en anglais moderne.*)

Quelques propriétés de la nature plus générales sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, essayez de déterminer si des propriétés de l'Univers lui-même y sont énumérées?)

Défi 175 e

* La langue française l'utilise toujours dans le mot «minuscule» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 14 Constantes cosmologiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Constante cosmologique	Λ	$\approx 1 \cdot 10^{-52}\,\mathrm{m}^{-2}$
Âge de l'Univers [a]	t_0	$4,333(53) \cdot 10^{17}\,\mathrm{s} = 13,8(0,1) \cdot 10^{9}\,\mathrm{a}$
(déterminée à partir de l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
Âge de l'Univers [a]	t_0	plus de $3,5(4) \cdot 10^{17}\,\mathrm{s} = 11,5(1,5) \cdot 10^{9}\,\mathrm{a}$
(déterminée à partir de la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la théorie quantique)		
Constante de Hubble [a]	H_0	$2,3(2) \cdot 10^{-18}\,\mathrm{s}^{-1} = 0,73(4) \cdot 10^{-10}\,\mathrm{a}^{-1}$
	$= h_0 \cdot 100\,\mathrm{km/s\,Mpc} = h_0 \cdot 1,0227 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{a}^{-1}$	
Constante de Hubble réduite [a]	h_0	0,71(4)
Paramètre de décélération [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	−0,66(10)
Distance de l'horizon de l'Univers [a]	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26}\,\mathrm{m} = 13,0(2)\,\mathrm{Gpc}$
Topologie de l'Univers		triviale jusqu'à 10^{26} m
Nombre de dimension spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
Densité critique	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg/m}^3$
de l'Univers		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg/m}^3$
Paramètre de densité (totale) [a]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
Paramètre de densité baryonique [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
Paramètre de densité de la matière noire froide [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
Paramètre de densité des neutrinos [a]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	entre 0,001 et 0,05
Paramètre de densité de l'énergie sombre [a]	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
Paramètre de l'équation d'état de l'énergie sombre	$w = p_X/\rho_X$	−1,0(2)
Masse des baryon	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Densité du nombre de baryons		$0,25(1)\,/\mathrm{m}^3$
Densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28}\,\mathrm{kg/m}^3$
Nombre d'étoiles dans l'Univers	n_s	$10^{22\pm1}$
Nombre de baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81\pm1}$
Température du fond diffus micro-onde [b]	T_0	2,725(1) K
Nombre de photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
Densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg/m}^3$
Densité du nombre de photons		$410,89\,/\mathrm{cm}^3$ ou $400\,/\mathrm{cm}^3 (T_0/2,7\,\mathrm{K})^3$
Amplitude des perturbations de densité	$\sqrt{S}$	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
Amplitude des ondes gravitationnelles	$\sqrt{T}$	$< 0,71\sqrt{S}$
Fluctuation de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
Indice spectral scalaire	n	0,93(3)
Variation de l'indice spectral scalaire	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	−0,03(2)
Longueur de Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35}\,\mathrm{m}$
Temps de Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44}\,\mathrm{s}$
Masse de Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 µg
Nombre d'instants dans l'histoire [a]	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1997–2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 14 Constantes cosmologiques(continuation).

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Nombre de points d'espace-temps à l'intérieur de l'horizon [a]	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot (t_0/t_{Pl})$	$10^{244\pm1}$
Masse à l'intérieur de l'horizon	M	$10^{54\pm1}$ kg

a. L'indice 0 indique des valeurs contemporaines.
b. Le rayonnement a été initié lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui ont conduit à la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4\,\mu K = 6(2) \cdot 10^{-6}\, T_0$.

Vol. II, page 231

NOMBRES UTILES

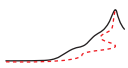
π	$3,14159\,26535\,89793\,23846\,26433\,83279\,50288\,41971\,69399\,37510_5$
e	$2,71828\,18284\,59045\,23536\,02874\,71352\,66249\,77572\,47093\,69995_9$
γ	$0,57721\,56649\,01532\,86060\,65120\,90082\,40243\,10421\,59335\,93992_3$
$\ln 2$	$0,69314\,71805\,59945\,30941\,72321\,21458\,17656\,80755\,00134\,36025_5$
$\ln 10$	$2,30258\,50929\,94045\,68401\,79914\,54684\,36420\,76011\,01488\,62877_2$
$\sqrt{10}$	$3,16227\,76601\,68379\,33199\,88935\,44432\,71853\,37195\,55139\,32521_6$

Ref. 169

Si le nombre π est *normal*, c.-à-d. si tous les chiffres et toutes les combinaisons de chiffres de son expansion décimale apparaissent avec la même fréquence, alors tous les textes qui ont déjà été écrits ou qui ne l'ont pas encore été, de même que toutes les paroles qui ont déjà été prononcées ou qui ne l'ont pas encore été, peuvent être retrouvés encodés dans sa séquence. La propriété de *normalité* n'a pas encore été démontrée, bien que l'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la sagesse soit encodée dans un simple cercle? Non. La propriété n'a rien de particulier: elle s'applique également au nombre $0,12345678910111213141516171819202 1...$ et à de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples?

Défi 176 e

Par ailleurs, sur la courbe de la fonction exponentielle e^x, le point $(0, 1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez en train de marquer en bleu tous les points du plan ayant deux coordonnées rationnelles, le plan vous paraîtra quasiment entièrement bleu. Pourtant, la courbe ne passe que par un seul de ces points et parvient à éviter tous les autres.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Annexe B

Les nombres et les espaces vectoriels

> A mathematician is a machine that transforms coffee into theorems.
>
> Paul Erdős**

Tous les concepts mathématiques peuvent s'exprimer en termes «d'ensembles» et de «relations». De nombreux concepts fondamentaux ont déjà été présentés dans les volumes précédents. Comment se fait-il, étant donné ces fondements simples, que les mathématiques puissent devenir une passion chez certaines personnes? Comment des ensembles et des relations peuvent-ils devenir le centre d'intérêt de la vie d'une personne? Les annexes mathématiques présentent quelques concepts avancés supplémentaires, aussi simplement et d'une manière aussi vivante que possible, pour tous ceux et celles qui veulent comprendre et ressentir la passion pour les mathématiques.

Vol. III, page 285

Ref. 170

Malheureusement, la passion pour les mathématiques n'est pas simple à repérer, parce que comme pour de nombreuses autres professions, les mathématiciens *cachent* eux-aussi leurs passions. En mathématiques, ceci se produit au travers du formalisme et en se détachant de façon apparente de l'intuition. Pourtant, un bon enseignement des mathématiques place l'intuition en premier. Dans cette annexe, nous allons introduire les structures *algébriques* les plus simples. Une annexe du prochain volume présentera quelques structures algébriques plus compliquées, puis, les structures *topologiques* les plus importantes. Le troisième type de structures mathématiques fondamentales, les structures *ordonnées*, n'est pas aussi important en physique (avec une exception: la définition des nombres réels contient une structure ordonnée).

Les mathématiciens s'intéressent non seulement à l'exploration des concepts, mais également à leur *classification*. Chaque fois qu'un nouveau concept mathématique est introduit, les mathématiciens tentent d'en classifier tous les cas et tous les types possibles. Cet objectif a été remplis de façon tout à fait spectaculaire pour les différents types de nombres, pour les groupes finis les plus simples et pour de nombreux types d'espaces et de variétés.

** «Un mathématicien est une machine qui transforme le café en théorèmes.» Paul Erdős (Budapest, 1913 – Varsovie, 1996).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les nombres en tant que structures mathématiques

Défi 177 pe

> A person who can solve $x^2 - 92y^2 = 1$ in less than a year is a mathematician.
>
> Brahmagupta*

Les enfants le savent: les nombres sont des entités que l'on peut additionner et multiplier. Les mathématiciens sont plus avisés. Tout système mathématique ayant les mêmes propriétés fondamentales que les *entiers naturels* s'appelle un *semi-anneau*. Tout système mathématique ayant les mêmes propriétés fondamentales que les *entiers relatifs*, s'appelle un *anneau*. (Les termes sont dus à David Hilbert. Les deux structures peuvent également être finies plutôt qu'infinies.) Plus précisément, un *anneau* $(R, +, \cdot)$ est un ensemble R d'éléments muni de deux opérations binaires, que l'on appelle l'*addition* et la *multiplication*, que l'on écrit habituellement + et · (le dernier symbole pouvant être simplement sous-entendu, donc sans notation explicite) et pour lesquelles les propriétés suivantes sont valides quels que soient les éléments $a, b, c \in R$:

— R est un groupe commutatif par rapport à l'addition, c.-à-d. $a + b \in R$, $a + b = b + a$, $a + 0 = a$, $a + (-a) = a - a = 0$ et $a + (b + c) = (a + b) + c$;
— la multiplication est une loi de composition interne dans R, c.-à-d. $ab \in R$;
— la multiplication est associative, c.-à-d. $a(bc) = (ab)c$;
— la multiplication est distributive par rapport à l'addition, c.-à-d. $a(b + c) = ab + ac$ et $(b + c)a = ba + ca$.

De nombreux auteurs ajoutent l'axiome suivant:

— la multiplication possède un élément neutre (ou élément unité), c.-à-d. $1a = a1 = a$.

Des propriétés servant à définir (telles que celles que l'on vient de citer) s'appellent des *axiomes*. Il faut bien comprendre que les axiomes *ne sont pas* des croyances fondamentales, tel qu'il est souvent affirmé ou sous-entendu. Les axiomes sont les propriétés fondamentales utilisées pour définir un concept: celui de l'anneau dans ce cas. Avec le dernier axiome, on parle également d'*anneau unitaire*.

Un *semi-anneau* est un ensemble qui satisfait tous les axiomes d'un anneau, excepté que l'existence d'un élément neutre et des éléments négatifs pour l'addition est remplacé par l'exigence plus faible que si $a + c = b + c$ alors $a = b$. En langage plus familier, un semi-anneau est un anneau «sans» éléments négatifs.

Pour incorporer la division et définir les nombres rationnels, il nous faut un autre concept. Un *corps* K est un anneau ayant

— un élément neutre 1 pour la multiplication, de sorte que tout élément a obéisse à $1a = a$;
— au moins un élément différent de zéro; et, le plus important
— un inverse (multiplicatif) a^{-1} pour tout élément $a \neq 0$.

Un anneau ou un corps est dit *commutatif* si la multiplication est commutative. Un corps non commutatif est aussi appelé un *corps gauche*. Les corps peuvent être finis ou infinis.

* «Une personne qui peut résoudre $x^2 - 92y^2 = 1$ en moins d'un an est un mathématicien.» Brahmagupta (Sindh, 598 – 668) (sous-entendu: résoudre pour des nombres entiers).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

(Un corps ou un anneau se caractérise par sa *caractéristique p*, qui est le plus petit nombre de fois qu'il est nécessaire d'additionner 1 avec lui-même pour donner zéro. Si un tel nombre n'existe pas, la caractéristique est considérée égale à 0. La caractéristique p est toujours un nombre premier ou zéro.) Tout corps fini est commutatif. Dans un corps, toute équation du type $cx = b$ et $xc = b$ ($c \neq 0$) a des solutions pour x. De plus, la solution est unique si $b \neq 0$. Pour résumer, en langage commun et en se concentrant sur la propriété la plus importante, un corps est un ensemble d'éléments pour lesquels, outre l'addition, la soustraction et la multiplication, on définit également une *division* (par les éléments non nuls). Les *nombres rationnels* forment le corps le plus simple qui incorpore les entiers.

Le système des *nombres réels* est l'extension minimale des nombres rationnels qui soit complète et totalement ordonnée.* Pouvez-vous montrer que $\sqrt{2}$ est un nombre réel, mais pas un nombre rationnel?

Défi 178 f

En physique classique et en théorie quantique, on insiste toujours sur le fait que les résultats des mesures sont et doivent être des nombres réels. Mais tous les nombres réels peuvent-ils être des résultats de mesures? Autrement dit, est-ce que tous les résultats de mesure ne forment qu'un sous-ensemble des réels?

Défi 179 e

Cependant, le concept de «nombre» n'est pas limité à ces exemples. Il peut se généraliser de plusieurs façons. La généralisation la plus simple s'obtient en étendant les nombres réels à des variétés de dimension supérieure à 1.

Ref. 171

Les nombres complexes

Dans la nature, les nombres complexes sont un moyen utile pour décrire sous forme compacte des systèmes et des situations qui font intervenir une *phase*. Les nombres complexes sont donc utiles pour décrire tous les types d'ondes.

Les nombres complexes forment une variété de dimension 2. Un nombre complexe est défini, sous sa forme cartésienne, par $z = a + ib$, où a et b sont deux nombres réels, et i est un nouveau symbole, que l'on appelle l'*unité imaginaire*. Lorsqu'ils sont multipliés entre eux, les deux générateurs de nombres complexes, 1 et i, obéissent à

$\cdot$	1	i
1	1	i
i	i	-1

(120)

* Un ensemble est mathématiquement *complet* si les physiciens le qualifient de continu. Plus précisément, un ensemble de nombres est *complet* si tout sous-ensemble non vide ayant des majorants a une borne supérieure.

Un ensemble est *totalement ordonné* s'il existe une relation binaire $\leqslant$ entre les paires d'éléments telle que pour tout éléments a et b

— si $a \leqslant b$ et $b \leqslant c$, alors $a \leqslant c$;
— si $a \leqslant b$ et $b \leqslant a$, alors $a = b$;
— on a toujours soit $a \leqslant b$ soit $b \leqslant a$.

En résumé, un ensemble est totalement ordonné s'il existe une relation binaire qui permette de dire pour chaque couple d'éléments lequel est le prédécesseur de l'autre de façon cohérente. Ceci est la structure ordonnée fondamentale que l'on utilise en physique (et c'est également la seule).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

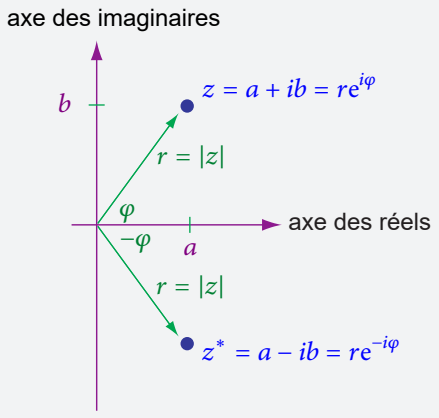


FIGURE 86 Les nombres complexes sont des points sur le plan de dimension 2. Un nombre complexe z et sont conjugué z^* peuvent être décrits sous leur forme cartésienne ou sous leur forme polaire.

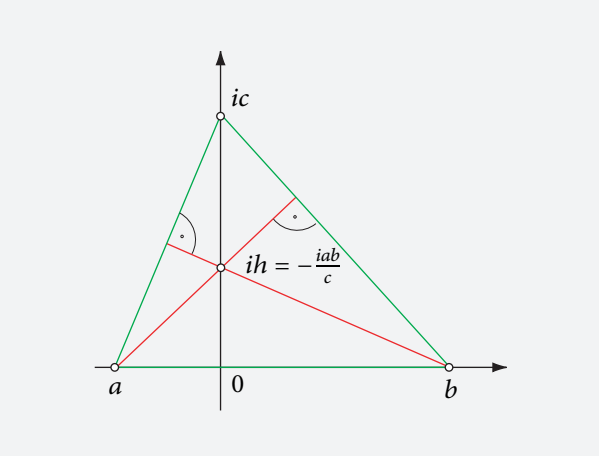


FIGURE 87 Une propriété des triangles facilement démontrable à l'aide des nombres complexes.

que l'on résume souvent en $i = +\sqrt{-1}$. Pour un nombre complexe $z = a + ib$, a s'appelle la *partie réelle* et b la *partie imaginaire*. Elles sont illustrées sur la Figure 86.

Le *complexe conjugué* z^*, que l'on écrit aussi $\bar{z}$, d'un nombre complexe $z = a + ib$ est défini par $z^* = a - ib$. La *valeur absolue* $|z|$ d'un nombre complexe est définie par $|z| = \sqrt{zz^*} = \sqrt{z^*z} = \sqrt{a^2 + b^2}$. Elle définit une *norme* sur l'espace vectoriel des nombres complexes. À partir de $|wz| = |w|\,|z|$ on en déduit le *théorème des deux carrés*:

$$(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) = (a_1b_1 - a_2b_2)^2 + (a_1b_2 + a_2b_1)^2 \,. \tag{121}$$

Il est valide pour tous nombres réels a_i et b_i. Il était déjà connu, dans sa version pour les entiers, par Diophante d'Alexandrie au IIIe siècle de notre ère.

Les nombres complexes peuvent également s'écrire comme des paires ordonnées (a, A) de nombres réels, avec leur addition définie par $(a, A) + (b, B) = (a + b, A + B)$ et leur multiplication définie par $(a, A) \cdot (b, B) = (ab - AB, aB + bA)$. Cette notation nous permet d'identifier les nombres complexes avec les *points* d'un plan ou, si on préfère, les *flèches* d'un plan. Traduire la définition de la multiplication en un langage géométrique

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 180 f nous permet de démontrer rapidement certains théorèmes géométriques, tel que celui de la Figure 87.

Les nombres complexes $a+ib$ peuvent également se représenter par des matrices 2×2

$$\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad a, b \in \mathbb{R} \,. \tag{122}$$

L'addition et la multiplication des matrices correspondent alors à l'addition et à la multiplication des nombres complexes. De cette façon, les nombres complexes peuvent se représenter par un type particulier de matrices réelles. À quoi correspond $|z|$ en termes
Défi 181 e de langage matriciel?

L'ensemble $\mathbb{C}$ des nombres complexes, muni de l'addition et de la multiplication telles que définies ci-dessus, forme un corps commutatif de dimension 2 ainsi qu'un espace
Page 265 vectoriel sur $\mathbb{R}$. Dans le corps des nombres complexes, l'équation quadratique $az^2+bz+c=0$, où z est l'inconnue, a toujours *deux* solutions (si $a \neq 0$ et en comptant les solutions
Défi 182 f multiples).

Les nombres complexes peuvent être utilisés pour décrire les points d'un plan. Une rotation autour de l'origine peut être décrite à l'aide de la multiplication par un nombre complexe de longueur unité. D'autres grandeurs de dimension 2 peuvent également être décrites en utilisant les nombres complexes. Les ingénieurs électriciens utilisent les nombres complexes pour décrire des grandeurs comportant des phases, tel que les courants alternatifs ou les champs électriques dans l'espace.

Écrire les nombres complexes de longueur unité sous la forme $\cos\theta + i\sin\theta$ est une méthode utile pour se rappeler les formules d'addition des angles. Puisque l'on a $\cos n\theta + i\sin n\theta = (\cos\theta + i\sin\theta)^n$, il est facile de déduire des formules telle que $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$ et $\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$. Par ailleurs, les nombres complexes de longueur unité
Défi 183 f
Défi 184 f forment le groupe de Lie SO(2)=U(1).

Tout nombre complexe peut s'écrire sous la forme

$$z = re^{i\varphi} \,. \tag{123}$$

Cette forme polaire de l'écriture des nombres complexes est la raison pour laquelle ils ont été introduits initialement. L'angle φ s'appelle la *phase* (ou encore l'argument [N.d.T.]); le nombre réel $r = |z|$ s'appelle la *valeur absolue* ou le *module* ou encore la *norme*. Lors de l'utilisation des nombres complexes pour décrire des oscillations ou des ondes, il est logique d'appeler r l'*amplitude*. La fonction exponentielle complexe est périodique de période $2\pi i$. Autrement dit, nous avons

$$e^1 = e^{1+2\pi i} \,, \tag{124}$$

qui montre la propriété à laquelle on s'attend pour un angle de phase.

Si on utilise la dernière équation deux fois, il est possible d'écrire

$$e^1 = e^{1+2\pi i} = (e^{1+2\pi i})^{1+2\pi i} = e^{(1+2\pi i)(1+2\pi i)} = e^{1-4\pi^2+4\pi i} = e^{1-4\pi^2} \,. \tag{125}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 185 f Oh là là, ceci implique $\pi = 0$! Qu'y a-t-il de faux ici?

Les nombres complexes peuvent également être utilisés pour décrire la géométrie plane euclidienne. Les rotations, les translations et autres isométries, mais aussi les réflexions, les réflexions glissées et les changements d'échelles se décrivent facilement par des opérations simples sur les nombres complexes qui représentent les coordonnées des points.

Par ailleurs, il y a exactement le même nombre de nombres complexes qu'il y a de
Défi 186 e nombres réels. Pouvez-vous le démontrer?

> Love is complex: it has real and imaginary parts.*
>
> Anonyme

Les quaternions

Les positions des points sur une lignes peuvent se décrire avec les nombres réels. Les nombres complexes peuvent être utilisés pour décrire les positions des points sur un plan. Il semble naturel d'essayer de généraliser l'idée d'un nombre pour un espace de dimension supérieure. Cependant, il se trouve qu'il n'est possible de définir aucun système de nombres utile dans un espace de dimension 3. Il est possible de construire un nouveau système de nombres, les *quaternions*, qui correspondent aux points d'un espace de dimension 4, mais seulement au prix du sacrifice de la commutativité de la multiplication. Aucun système de nombres utile ne peut être défini pour des dimensions autres que 1, 2 et 4.

Les quaternions ont été découverts par plusieurs mathématiciens au cours du XIXe siècle, parmi lesquels Hamilton,** qui les étudia durant une grande partie de sa vie. En fait, la théorie de l'électrodynamique de Maxwell avait été formulée en termes de qua-
Ref. 173 ternions avant que les vecteurs de dimension 3 ne soient utilisés.

Vol. V, page 358 Munis de la multiplication, les quaternions $\mathbb{H}$ forment une algèbre de dimension 4 sur les réels avec pour base $1, i, j, k$ satisfaisant:

$\cdot$	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	$-j$
j	j	$-k$	-1	i
k	k	j	$-i$	-1

(126)

Ces relations sont également souvent écrites $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, $ij = -ji = k$, $jk = -kj = i$, $ki = -ik = j$. Les quaternions $1, i, j, k$ sont également appelés les *unités de base* ou les *générateurs*. L'absence de symétrie par rapport à la diagonale du tableau montre la non-commutativité de la multiplication quaternionique. C'est avec les quaternions que l'idée d'un produit non-commutatif est apparue pour la première fois en mathématique. En revanche, la multiplication des quaternions *est* associative. Une conséquence de la

* «L'amour est complexe, il a des parties réelles et des parties imaginaires.»

** William Rowan Hamilton (Dublin, 1805 – Dunsink, 1865), enfant prodige et mathématicien célèbre, il donna leur nom aux quaternions d'après une expression de la Vulgate (Acte des Apôtres 12:4).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

non-commutativité est que les équations polynomiales de quaternions ont beaucoup plus de solutions que celles des nombres complexes (recherchez simplement les solutions de l'équation $X^2 + 1 = 0$ pour vous en convaincre).

Défi 187 e

Tout quaternion X peut s'écrire sous la forme

$$X = x_0 + x_1 i + x_2 j + x_3 k = x_0 + \boldsymbol{v} = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (x_0, \boldsymbol{v}) \,, \tag{127}$$

où x_0 s'appelle la *partie scalaire* et $\boldsymbol{v}$ la *partie vectorielle*. La multiplication est donc définie par $(x, \boldsymbol{v})(y, \boldsymbol{w}) = (xy - \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, x\boldsymbol{w} + y\boldsymbol{v} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$. La multiplication de deux quaternions sous leur forme la plus générale peut s'écrire

$$\begin{aligned}(a_1, b_1, c_1, d_1)(a_2, b_2, c_2, d_2) = (a_1a_2 - b_1b_2 - c_1c_2 - d_1d_2 \,,\ a_1b_2 + b_1a_2 + c_1d_2 - d_1c_2,\\ a_1c_2 - b_1d_2 + c_1a_2 + d_1b_2, a_1d_2 + b_1c_2 - c_1b_2 + d_1a_2) \,.\end{aligned} \tag{128}$$

Le quaternion conjugué $\overline{X}$ est défini par $\overline{X} = x_0 - \boldsymbol{v}$, de sorte que $\overline{XY} = \overline{Y}\ \overline{X}$. La *norme* $|X|$ d'un quaternion X est définie par $|X|^2 = X\overline{X} = \overline{X}X = x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = x_0^2 + \boldsymbol{v}^2$. La norme est multiplicative, c.-à-d. $|XY| = |X|\ |Y|$.

Contrairement aux nombres complexes, chaque quaternion est lié à son conjugué par la relation

$$\overline{X} = -\tfrac{1}{2}(X + iXi + jXj + kXk) \,. \tag{129}$$

Il n'existe pas de relation de ce type pour les nombres complexes. Dans le langage de la physique, un nombre complexe et son conjugué sont des variables indépendantes, alors que ce n'est pas le cas pour les quaternions. Par conséquent, les fonctions de quaternions sont moins utiles en physique que les fonctions de variables complexes.

La relation $|XY| = |X|\ |Y|$ implique le *théorème des quatre carrés*:

$$\begin{aligned}&(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2)\\ &= (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4)^2 + (a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3)^2\\ &+ (a_1b_3 + a_3b_1 + a_4b_2 - a_2b_4)^2 + (a_1b_4 + a_4b_1 + a_2b_3 - a_3b_2)^2\end{aligned} \tag{130}$$

qui est valide pour tous nombres réels a_i et b_i, et donc également pour n'importe quel ensemble de huit entiers. Il fut découvert en 1748 par Leonhard Euler (1707 – 1783) alors qu'il essayait de démontrer que tout entier était la somme de quatre carrés. (Ce dernier fait ne fut démontré qu'en 1770 par Joseph Lagrange.)

Hamilton pensait qu'un quaternion dont la partie scalaire était nulle, qu'il appelait simplement un *vecteur* (un terme qu'il inventa), pouvait être identifié à un vecteur de translation ordinaire en dimension 3. Mais ceci est faux. Un tel quaternion s'appelle aujourd'hui un quaternion *purement imaginaire*, ou *homogène*, ou simplement *imaginaire*. Le produit de deux quaternions purement imaginaires $V = (0, \boldsymbol{v})$ et $W = (0, \boldsymbol{w})$ est donné par $VW = (-\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$, où $\cdot$ dénote le produit scalaire et $\times$ dénote le produit vectoriel. Notez que tout quaternion peut s'écrire comme le rapport de deux quaternions purement imaginaires.

En réalité, un quaternion purement imaginaire $(0, \boldsymbol{v})$ ne se comporte pas comme un

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

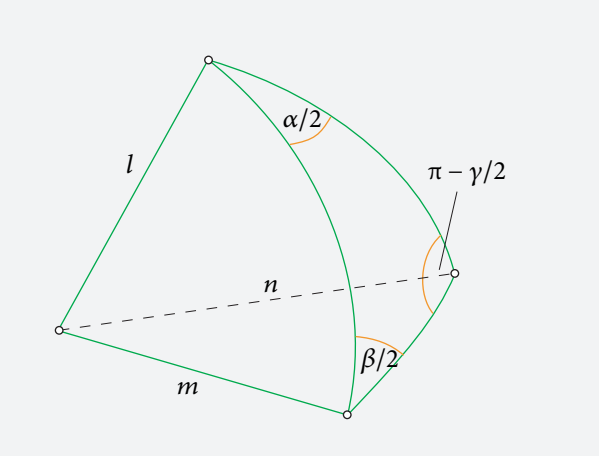


FIGURE 88 Combinaisons de rotations.

vecteur de translation lors des transformations de coordonnées. En fait, un quaternion purement imaginaire représente une *rotation* d'angle π ou 180° autour de l'axe défini par la direction $\boldsymbol{v} = (v_x, v_y, v_z)$.

Défi 188 pe

Il se trouve que dans un espace de dimension 3, une rotation *générale* autour de l'origine peut être décrite par un quaternion *unitaire* Q, que l'on appelle aussi un quaternion *normé*, pour lequel $|Q| = 1$. Un tel quaternion peut s'écrire $(\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$, où $\boldsymbol{n} = (n_x, n_y, n_z)$ est le vecteur normé décrivant la direction de l'axe de rotation et θ est l'angle de rotation. Un tel quaternion unitaire $Q = (\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$ fait tourner un quaternion purement imaginaire $V = (0, \boldsymbol{v})$ en un autre quaternion purement imaginaire $W = (0, \boldsymbol{w})$ obtenu par

$$W = QVQ^* \,. \tag{131}$$

Donc, si on utilise des quaternions purement imaginaires tels que V et W pour décrire les positions, on peut utiliser les quaternions unitaires pour décrire les rotations et pour calculer les transformations de coordonnées. La concaténation de deux rotations s'obtient alors par le produit des quaternions unitaires correspondants. En effet, une rotation d'angle α autour d'un axe $\boldsymbol{l}$ suivi d'une rotation d'angle β autour d'un axe $\boldsymbol{m}$ produit une rotation d'un angle γ autour d'un axe $\boldsymbol{n}$, avec les valeurs déterminées par

$$(\cos\gamma/2, \boldsymbol{n}\sin\gamma/2) = (\cos\beta/2, \boldsymbol{m}\sin\beta/2)(\cos\alpha/2, \boldsymbol{l}\sin\alpha/2) \,. \tag{132}$$

Une façon de montrer le résultat graphiquement est donné par la Figure 88. En traçant un triangle sur une sphère de rayon 1, et en prenant soin de se rappeler du facteur 1/2 pour les angles, la combinaison de deux rotations se détermine simplement.

L'interprétation des quaternions comme étant des rotations, est également illustrée, d'une façon quelque peu différente, par le mouvement de n'importe quelle main. Pour vous en rendre compte, prenez un marqueur vert et écrivez les lettres 1, i, j et k sur votre main, comme le montre la Figure 89. En définissant les trois axes possibles pour des rotations de 180° comme ils sont positionnés sur la figure, et en utilisant la concaténation comme multiplication, le mouvement de la main droite suit les mêmes «lois» que celles

Ref. 174

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

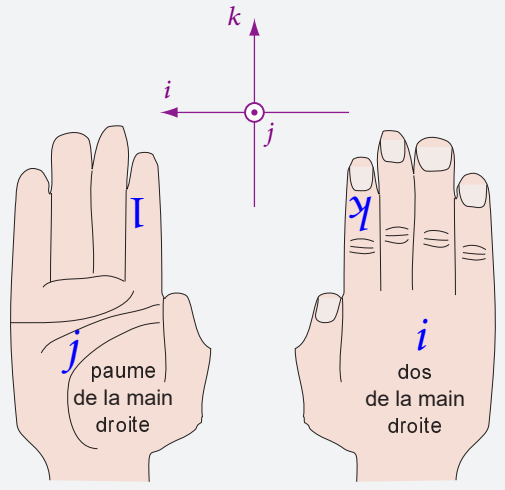


FIGURE 89 La paume et le dos de la main droite, et les quaternions.

Défi 189 f

des quaternions unitaires purement imaginaires. (Il faut distinguer $+i$ et $-i$, de même que pour les autres unités, par le sens de la torsion du bras. Le résultat d'une multiplication est la lettre qui peut être lue par une personne qui vous fait face.) Vous pouvez montrer

Défi 190 e

que $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, que $i^4 = 1$, et vous pouvez retrouver toutes les autres relations des quaternions. Le modèle montre également que l'angle de rotation du bras est la moitié de l'angle de rotation du quaternion correspondant. Autrement dit, les quaternions peuvent être utilisés pour décrire le tour (l'astuce) de la ceinture, si on considère que la multiplication VW de deux quaternions signifie que la rotation V se produit *après* la

Page 147

rotation W. Les quaternions, comme les mains humaines, se comporte donc comme des particules de spin 1/2. Les quaternions et les spineurs sont isomorphes.

La raison du comportement des rotations en demi-angle peut se préciser plus en détails en utilisant le langage mathématique. Les rotations autour d'un point en dimension 3 forment le «groupe spécial orthogonal» de dimension 3, que l'on appelle SO(3). Mais les mouvements d'une main attachée à une épaule par un bras forment un groupe différent, isomorphe au groupe de Lie SU(2). La différence est due à l'apparition des demi-angles dans la paramétrisation des rotations. En effet, les paramétrisations ci-dessus impliquent qu'une rotation de 2π corresponde à une multiplication par -1. Ce n'est seulement qu'au XXe siècle que l'on s'est rendu compte qu'il existait des observables physiques fondamentales qui se comportaient comme des mains attachées à des bras: on les appelle des *spineurs*. Vous trouverez plus de détails sur les spineurs dans la section sur

Vol. V, page 369

Page 147

les symétries de permutations, où les ceintures sont utilisées comme analogie, de même que les bras. En bref, le groupe SU(2) formé des quaternions unitaires est le *revêtement*

Ref. 175

double du groupe de rotations SO(3).

La représentation simple des rotations et des positions à l'aide des quaternions est utilisée dans les programmes informatiques en robotique, en astronomie et dans les simulateurs de vol. Dans les logiciels utilisés pour créer des images ou des animations en trois dimensions (les logiciels de visualisation), les quaternions sont souvent utilisés pour calculer la trajectoire que suivent les rayons lumineux qui se réfléchissent de nombreuses fois, ce qui donne ainsi une apparence réaliste aux surfaces.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L'algèbre des quaternions est la seule algèbre normée, associative, non-commutative et de dimension finie sur le corps des nombres réels ayant un élément unité. Les quaternions forment un corps non-commutatif, c.-à-d. un corps gauche, pour lequel l'inverse d'un quaternion X est $\overline{X}/|X|$. On peut donc définir une division pour les quaternions (tout en prenant soin de distinguer XY^{-1} et $Y^{-1}X$). Par conséquent, on dit que les quaternions forment une *algèbre à division*. En fait, les quaternions $\mathbb{H}$, les nombres complexes $\mathbb{C}$ et les nombres réels $\mathbb{R}$ sont les trois seules algèbres à division de dimension finie et associatives. Autrement dit, le corps gauche des quaternions est la seule algèbre de dimension finie, réelle, associatives et non-commutative sans diviseur de zéro. Le *centre* des quaternions, c.-à-d. l'ensemble des quaternions qui commutent avec tous les autres quaternions, est simplement l'ensemble des nombres réels.

Les quaternions peuvent se représenter par des matrices de la forme

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad A, B \in \mathbb{C} \quad \text{donc} \quad A = a + ib, B = c + id \,, \tag{133}$$

ou, alternativement, par

$$\begin{pmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & -d & c \\ -c & d & a & -b \\ -d & -c & b & a \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad a, b, c, d \in \mathbb{R} \,, \tag{134}$$

où le quaternion X est alors donné par $X = A + Bj = a + ib + jc + kd$. L'addition et la multiplication des matrices correspondent alors à l'addition et à la multiplication des quaternions.

Les générateurs des quaternions peuvent s'obtenir par

$$1 : \sigma_0 \quad , \quad i : -i\sigma_1 \quad , \quad j : -i\sigma_2 \quad , \quad k : -i\sigma_3 \,, \tag{135}$$

où les σ_n sont les matrices de spin de Pauli.*

Les représentations réelles 4×4 ne sont pas uniques, comme le montre la représentation alternative suivante.

$$\begin{pmatrix} a & b & -d & -c \\ -b & a & -c & d \\ d & c & a & b \\ c & -d & -b & a \end{pmatrix} \tag{137}$$

Défi 191 pe Aucune représentation des quaternions par des matrices 3×3 n'est possible.

* Les *matrices de spin de Pauli* sont les matrices hermitiennes complexes

$$\sigma_0 = \mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{136}$$

qui ont toutes pour valeurs propres ± 1. Elles satisfont les relations $[\sigma_i, \sigma_k]_+ = 2\,\delta_{ik}$ et $[\sigma_i, \sigma_k] = 2i\,\varepsilon_{ikl}\,\sigma_l$. Les combinaisons linéaires $\sigma_\pm = \frac{1}{2}(\sigma_1 \pm \sigma_2)$ sont aussi fréquemment utilisées. Par ailleurs, une autre représentation possible des quaternions est $i : i\sigma_3$, $j : i\sigma_2$, $k : i\sigma_1$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ces matrices contiennent des éléments réels et complexes, qui ne présentent aucuns problèmes particuliers. Par contre, quand on construit des matrices avec des éléments quaternioniques, il faut faire attention, parce que la multiplication quaternionique n'est pas commutative, de sorte que certaines relations simples, tel que $\mathrm{tr}AB = \mathrm{tr}BA$, ne sont en général *pas* valides.

Que peut-on apprendre des quaternions concernant la description de la nature? Tout d'abord, nous voyons que les rotations binaires sont similaires aux positions, et donc aux translations: toutes sont représentées par des vecteurs de dimension 3. Les rotations sont-elles les opérations fondamentales de la nature? Est-il possible que les translations ne soient que les «ombres» des rotations? Le lien entre les translations et les rotations est étudié dans le dernier volume de notre ascension de la montagne.

Vol. VI, page 174

Lorsque Maxwell écrivait ses équations de l'électrodynamique, il utilisait la notation des quaternions. (La notation d'aujourd'hui utilisant des vecteurs de dimension 3, fut introduite plus tard par Hertz et Heaviside.) Les équations peuvent s'écrire de différentes façons en utilisant les quaternions. La plus simple est celle qui consiste à garder la distinction entre $\sqrt{-1}$ et les unités i, j, k des quaternions. Il est alors possible d'écrire toute l'électrodynamique en une équation simple:

Vol. III, page 76

Ref. 173

Défi 192 e

$$\mathrm{d}F = -\frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{138}$$

dans laquelle F est le champ électrodynamique généralisé et Q la charge généralisée. Ils sont définis par

$$\begin{aligned} F &= E + \sqrt{-1}\,cB \\ E &= iE_x + jE_y + kE_z \\ B &= iB_x + jB_y + kB_z \\ \mathrm{d} &= \delta + \sqrt{-1}\,\partial_t/c \\ \delta &= i\partial_x + j\partial_y + k\partial_z \\ Q &= \rho + \sqrt{-1}\,J/c \end{aligned} \tag{139}$$

où les champs E et B et les distributions de charge ρ et J ont les significations habituelles. Le contenu de l'équation (138) pour le champ électromagnétique est exactement le même que la formulation habituelle.

Malgré leur charme et le fait qu'ils soient de dimension 4, les quaternions ne semble pas être d'une grande utilité pour la reformulation de la relativité restreinte. La raison principale à ceci est le signe dans l'expression de leur norme. Par conséquent, la relativité et l'espace-temps sont généralement décrits en utilisant les nombres réels. Et même si les quaternions étaient utiles, ils n'apporteraient pas d'éléments supplémentaires à la compréhension de la physique ou de la nature.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les octonions

De la même façon que les quaternions sont construits à partir des nombres complexes, les *octonions* peuvent se construire à partir des quaternions. Ils ont été étudiés pour la première fois par Arthur Cayley (1821 – 1895). Munis de la multiplication, les *octonions* (que l'on appelle encore les *octaves*) sont les éléments d'une algèbre de dimension 8 sur les réels avec les générateurs $1, i_n$ pour $n = 1 \dots 7$ satisfaisant:

$\cdot$	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
1	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1	i_1	-1	i_3	$-i_2$	i_5	$-i_4$	i_7	$-i_6$
i_2	i_2	$-i_3$	-1	i_1	$-i_6$	i_7	i_4	$-i_5$
i_3	i_3	i_2	$-i_1$	-1	i_7	i_6	$-i_5$	$-i_4$
i_4	i_4	$-i_5$	i_6	$-i_7$	-1	i_1	$-i_2$	i_3
i_5	i_5	i_4	$-i_7$	$-i_6$	$-i_1$	-1	i_3	i_2
i_6	i_6	$-i_7$	$-i_4$	i_5	i_2	$-i_3$	-1	i_1
i_7	i_7	i_6	i_5	i_4	$-i_3$	$-i_2$	$-i_1$	-1

(140)

En fait, 479 autres tables de multiplication équivalentes sont également possibles. Cette algèbre s'appelle l'*algèbre de Cayley*; elle a un élément unité et une division unique. L'algèbre n'est pas commutative, et n'est pas non plus associative. En revanche, elle est *alternative*, ce qui signifie que pour tout éléments x et y, on a $x(xy) = x^2 y$ et $(xy)y = xy^2$: une propriété quelque peu plus faible que l'associativité. C'est la seule algèbre réelle, alternative, de dimension 8 n'ayant pas de diviseurs de zéro. Parce qu'il n'est pas associatif, l'ensemble $\mathbb{O}$ de tous les octonions ne constitue pas un corps, ni même un anneau, de sorte que l'ancienne désignation de «nombres de Cayley» a été abandonnée. Les octonions sont les «nombres» hypercomplexes les plus généraux dont la norme est multiplicative. Ses générateurs obéissent à $(i_n i_m) i_l = \pm i_n (i_m i_l)$, où le signe moins, qui montre la non-associativité, est valide pour les combinaisons d'indices qui ne sont pas quaternioniques, tel que 1-2-4.

Les octonions peuvent se représenter par des matrices de la forme

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -\bar{B} & \bar{A} \end{pmatrix} \text{ où } A, B \in \mathbb{H}\,, \quad \text{ou encore par des matrices réelles } 8 \times 8. \tag{141}$$

La multiplication des matrices donne alors le même résultat que la multiplication des octonions.

La relation |wz|=|w||z| nous permet de déduire l'impressionnant]théorème des huit

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

carrés:

$$\begin{aligned}(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 + a_7^2 + a_8^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2 + b_7^2 + b_8^2) \\ = (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4 - a_5b_5 - a_6b_6 - a_7b_7 - a_8b_8)^2 \\ + (a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3 + a_5b_6 - a_6b_5 + a_7b_8 - a_8b_7)^2 \\ + (a_1b_3 - a_2b_4 + a_3b_1 + a_4b_2 - a_5b_7 + a_6b_8 + a_7b_5 - a_8b_6)^2 \\ + (a_1b_4 + a_2b_3 - a_3b_2 + a_4b_1 + a_5b_8 + a_6b_7 - a_7b_6 - a_8b_5)^2 \\ + (a_1b_5 - a_2b_6 + a_3b_7 - a_4b_8 + a_5b_1 + a_6b_2 - a_7b_3 + a_8b_4)^2 \\ + (a_1b_6 + a_2b_5 - a_3b_8 - a_4b_7 - a_5b_2 + a_6b_1 + a_7b_4 + a_8b_3)^2 \\ + (a_1b_7 - a_2b_8 - a_3b_5 + a_4b_6 + a_5b_3 - a_6b_4 + a_7b_1 + a_8b_2)^2 \\ + (a_1b_8 + a_2b_7 + a_3b_6 + a_4b_5 - a_5b_4 - a_6b_3 - a_7b_2 + a_8b_1)^2 \end{aligned} \tag{142}$$

qui est valide pour tous nombres réels a_i et b_i et donc en particulier pour tous les entiers. (Il existe de nombreuses variantes de cette expression, avec différentes combinaisons possibles pour les signes.) Le théorème a été découvert en 1818 par Carl Ferdinand Degen (1766 – 1825), puis ensuite redécouvert en 1844 par John Graves et en 1845 par Arthur Cayley. Il n'existe pas de généralisation pour un nombre plus élevé de carrés, un fait démontré par Adolf Hurwitz (1859 – 1919) en 1898.

Les octonions peuvent être utilisés pour montrer qu'un produit vectoriel peut être défini dans des espaces de dimension supérieure à 3. Un produit vectoriel est une opération $\times$ (noté également $\cap$ dans la littérature française [N.d.T.]) satisfaisant

$$\begin{aligned} u \times v = -v \times u \quad & \textit{anticommutativité} \\ (u \times v)\, w = u\, (v \times w) \quad & \textit{règle d'échange.} \end{aligned} \tag{143}$$

En utilisant la définition

$$X \times Y = \frac{1}{2}(XY - YX)\ , \tag{144}$$

les produits vectoriels de quaternions purement imaginaires, c.-à-d. de quaternions de type $(0, \boldsymbol{u})$, sont eux aussi purement imaginaires, et correspondent au produit vectoriel usuel en dimension 3, satisfaisant donc à (143). Il est intéressant de noter qu'il est également possible d'utiliser la définition (144) pour les *octonions*. Dans ce cas, le produit d'octonions purement imaginaires est aussi purement imaginaire, et (143) est à nouveau satisfaite. Il se trouve que ceci est le seul autre exemple non trivial de produit vectoriel.

Ref. 171
Défi 193 f

En résumé, *le produit vectoriel n'existe qu'en dimension* 3 *et en dimension* 7. De nombreux érudits ont conjecturé que cette relation pouvait avoir un rapport avec la possibilité que la nature puisse être de dimension 10. Cependant, ces spéculations n'ont pas rencontré beaucoup de succès.

Les symétries des forces de la nature conduisent à une question bien connue. Les nombres complexes unitaires forment le groupe de Lie U(1) et les quaternions unitaires forment le groupe de Lie SU(2). Est-ce que les octonions unitaires forment le groupe de Lie SU(3)?

Défi 194 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

D'AUTRES TYPES DE NOMBRES

Le processus de construction de nouveaux systèmes de «nombres» hypercomplexes (de nouvelles algèbres réelles) en «doublant» un système existant, peut se répéter à l'infini. Cependant, les octonions, les *sédénions* et tous les doublements suivants sont ni des anneaux ni des corps, mais seulement des algèbres non associatives ayant un élément unité. D'autres algèbres de dimension finie sur les réels et ayant un élément unité (que l'on appelait autrefois des «nombres» hypercomplexes) peuvent également être définies. Ce sont par exemple les ensembles que l'on appelle «nombres duaux», «nombres doubles», «nombres de Clifford-Lifshitz», etc. Ces algèbres ne jouent aucun rôle en physique.

Les mathématiciens ont également défini des corps de nombres qui sont de dimension «un et un chouïa», tels que les corps de nombres algébriques. Il existe également une
Ref. 176 généralisation du concept d'entiers au domaine complexe: les *entiers!de Gauss*, définis par $n+im$, où n et m sont des entiers ordinaires. Gauss avait même défini ce qui est connu
Défi 195 e aujourd'hui comme les *nombres premiers de Gauss*. (Pouvez-vous trouver comment?) Ils ne sont pas utilisés pour la description de la nature, mais sont importants en théorie des nombres, qui explore les propriétés des entiers.

Les physiciens avaient l'habitude d'appeler les opérateurs de la mécanique quantique les «nombres q». Mais ce terme n'est plus de mode aujourd'hui.

Une autre façon d'étendre les nombres naturels est de leur ajouter des nombres plus
Ref. 177 grands que l'infini. Les plus importantes catégories de ses *nombres transfinis* sont les nombres *ordinaux* transfinis, les nombres *cardinaux* transfinis et les *nombres surréels*.
Vol. III, page 293 Les nombres ordinaux transfinis sont essentiellement une extension des entiers au-delà de l'infini, alors que les nombres surréels sont une extension continue des réels, également au-delà de l'infini. Pour parler plus simplement: parmi les nombres transfinis, les nombres ordinaux transfinis jouent un rôle similaire à celui que les entiers jouent parmi les nombres réels: les nombres surréels comblent les trous entre les ordinaux transfinis, tout comme les réels le font pour les entiers. Il est intéressant de noter que de nombreuses séries qui divergent dans $\mathbb{R}$ convergent dans l'ensemble des nombres surréels. Pouvez-
Défi 196 pe vous trouver un exemple?

Les nombres surréels incluent les nombres infiniment petits, tout comme le font les
Ref. 171 nombres de l'*analyse non standard*, que l'on appelle également les *nombres hyperréels*. Dans les deux systèmes de nombres, au contraire des nombres réels, les nombres 1 et $0,999\,999\ldots$ (où l'on suppose une suite infinie, mais hyperfinie, de neuf) ne coïncident
Vol. III, page 295 pas, mais sont séparés par un nombre infini d'autres nombres. Nous avons exploré les nombres surréels un peu plus tôt. Les nombres non standards permettent de définir la
Ref. 172 notion d'infinitésimal que l'on utilise en calcul intégral et différentiel, même au lycée.

DES ESPACES VECTORIELS AUX ESPACES DE HILBERT

Les espaces vectoriels (parfois appelés *espaces linéaires*) sont des généralisations mathématiques de certains aspects de l'espace de dimension 3 intuitif. Un ensemble dont les éléments peuvent être additionnés deux par deux et peuvent être multipliés individuellement par un nombre, s'appelle un espace vectoriel si les résultats font également partie de l'ensemble et si les règles usuelles de calcul s'appliquent.

Plus précisément, un *espace vectoriel* sur un corps K est un ensemble d'éléments, appelés *vecteurs*, pour lesquels une addition vectorielle et une *multiplication par un scalaire*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont définies, de sorte que pour tout vecteurs a, b, c et pour tout nombre s et r de K on a

$$\begin{aligned}
(a+b)+c = a+(b+c) = a+b+c &\quad \textit{associativité de l'addition des vecteurs} \\
n+a = a &\quad \textit{existence d'un vecteur nul} \\
(-a)+a = n &\quad \textit{existence d'un vecteurs opposé} \\
1a = a &\quad \textit{régularité de la multiplication par un scalaire} \\
(s+r)(a+b) = sa+sb+ra+rb &\quad \textit{distributivité complète de la multiplication par un scalaire}
\end{aligned} \tag{145}$$

Si le corps K, dont les éléments sont appelés des *scalaires* dans ce contexte, est choisis comme étant celui des nombres réels (ou des nombres complexes, ou des quaternions), on parle alors d'espace vectoriel réel (ou complexe, ou quaternionique). Les espaces vectoriels sont parfois appelés *espace vectoriel!linéaires* ou simplement *espaces linéaires*.

Les nombre complexes, l'ensemble de toutes les fonctions réelles définies sur la droite des réels, l'ensemble de tous les polynôme, l'ensemble des matrices ayant un nombre de lignes et un nombre de colonnes donnés, forment tous des espaces vectoriels. En mathématiques, un vecteur est donc un concept beaucoup plus général qu'en physique. (Quel est l'espace vectoriel mathématique le plus simple possible?)

Défi 197 e

En physique, le terme «vecteur» est réservé aux éléments d'espaces vectoriels d'un type plus spécialisé, du fait qu'il possède une norme dérivant d'un produit scalaire. Pour pouvoir les définir, nous avons d'abord besoin du concept d'espace métrique.

Un *espace!métrique* est un ensemble muni d'une métrique, c.-à-d. un moyen de définir des distances entre ses éléments. Une fonction réelle $d(a,b)$ entre éléments s'appelle une métrique si

$$\begin{aligned}
d(a,b) \geqslant 0 &\quad \textit{positivité de la métrique} \\
d(a,b)+d(b,c) \geqslant d(a,c) &\quad \textit{inégalité triangulaire} \\
d(a,b) = 0 \quad \text{si et seulement si} \quad a = b &\quad \textit{régularité de la métrique}
\end{aligned} \tag{146}$$

Un exemple non trivial est le suivant. Nous définissons une distance spéciale d entre villes. Si les deux villes se situent sur une ligne qui passe par Paris, nous utilisons la distance usuelle. Dans tous les autres cas, nous définissons la distance d comme étant la plus courte distance lorsque l'on voyage d'une ville à l'autre via Paris. Cette méthode étrange définit une métrique entre toutes les villes de France, que l'on appelle la *distance ferroviaire française*.

Défi 198 e

Un espace vectoriel *normé* est un espace vectoriel muni d'une norme (ou «longueur») associée à chaque vecteur. Une *norme* est un nombre positif ou nul $\|a\|$ défini pour chaque vecteur a et ayant les propriétés

$$\begin{aligned}
\|ra\| = |r|\,\|a\| &\quad \textit{linéarité de la norme} \\
\|a+b\| \leqslant \|a\| + \|b\| &\quad \textit{inégalité triangulaire} \\
\|a\| = 0 \quad \text{seulement si} \quad a = 0 &\quad \textit{régularité.}
\end{aligned} \tag{147}$$

En règle générale, il existe de nombreuses façons de définir une norme pour un espace vectoriel donné. Notez qu'il est toujours possible de définir une métrique à partir d'une

Défi 199 pe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

norme en posant

$$d(a,b) = \|a - b\| \tag{148}$$

de sorte que tous les espaces normés sont également des espaces métriques. Ceci est la définition de la distance *naturelle* (contrairement aux distances non naturelles telle que celle que nous avons définie ci-dessus entre les villes françaises).

La norme est souvent définie à l'aide d'un produit scalaire. En effet, la classe d'espaces vectoriels la plus intéressante est celle des *espaces vectoriels munis d'un produit scalaire*[*] $\cdot$ (qui ne doit pas être confondu avec la multiplication par un scalaire!) qui associe un nombre à toute paire de vecteurs. Un espace vectoriel munis d'un produit scalaire sur $\mathbb{R}$ satisfait

$$\begin{aligned}
a \cdot b = b \cdot a & \quad \textit{commutativité du produit scalaire} \\
(ra) \cdot (sb) = rs(a \cdot b) & \quad \textit{bilinéarité du produit scalaire} \\
(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c & \quad \textit{distributivité à droite du produit scalaire} \\
a \cdot (b+c) = a \cdot b + a \cdot c & \quad \textit{distributivité à gauche du produit scalaire} \\
a \cdot a \geqslant 0 & \quad \textit{positivité du produit scalaire} \\
a \cdot a = 0 \quad \text{si et seulement si} \quad a = 0 & \quad \textit{régularité du produit scalaire}
\end{aligned} \tag{149}$$

pour tout vecteur a, b, c et pour tout scalaire r, s. Un espace vectoriel *réel* de dimension finie munis d'un produit scalaire s'appelle également un *espace vectoriel!euclidien*. L'ensemble de toutes les vitesses, l'ensemble de toutes les positions, ou l'ensemble de toutes les quantités de mouvement forment de tels espaces.

Un espace vectoriel munis d'un produit scalaire sur $\mathbb{C}$ satisfait[**]

$$\begin{aligned}
a \cdot b = \overline{b \cdot a} = \overline{b} \cdot \overline{a} & \quad \textit{propriété hermitienne} \\
(ra) \cdot (sb) = r\overline{s}(a \cdot b) & \quad \textit{sesquilinéarité du produit scalaire} \\
(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c & \quad \textit{distributivité à droite du produit scalaire} \\
a \cdot (b+c) = a \cdot b + a \cdot c & \quad \textit{distributivité à gauche du produit scalaire} \\
a \cdot a \geqslant 0 & \quad \textit{positivité du produit scalaire} \\
a \cdot a = 0 \quad \text{si et seulement si} \quad a = 0 & \quad \textit{régularité du produit scalaire}
\end{aligned} \tag{150}$$

pour tout vecteur a, b, c et tout scalaire r, s. Un espace vectoriel *complexe* de dimension finie munis d'un produit scalaire s'appelle également un espace vectoriel *unitaire* ou *hermitien*. Si l'espace vectoriel muni d'un produit scalaire est *complet*, il est appelé *espace!de Hilbert*, tout particulièrement dans le cas d'un espace complexe de dimension infinie. L'espace de tous les états possibles d'un système quantique constitue un espace de Hilbert.

Page 254

Tous les espaces vectoriels munis d'un produit scalaire sont aussi des espaces mé-

[*] Le produit scalaire est parfois appelé *produit intérieur* [N.d.T.].

[**] Il existe deux formes non-équivalentes de l'axiome de sesquilinéarité. La seconde est $(ra)\cdot(sb) = \overline{r}s(a\cdot b)$. Le terme sesquilinéaire vient du latin et signifie «une fois et demie linéaire».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

triques, et donc également des espaces normés, si la métrique est définie par

$$d(a,b) = \sqrt{(a-b)\cdot(a-b)}\,. \tag{151}$$

Ce n'est que dans ce contexte d'espace vectoriel muni d'un produit scalaire que l'on peut parler d'angles (ou de différence de phase) entre des vecteurs, comme on en a l'habitude en physique. Bien sûr, tout comme pour les espaces normés, les espaces vectoriels munis d'un produit scalaire nous permettent également de parler de la longueur des vecteurs et de définir une *base* (le concept mathématique nécessaire pour définir un système de coordonnées). Quels sont les espaces vectoriels, ou les espaces vectoriels munis d'un produit scalaire, qui sont importants en physique?

Défi 200 e

La *dimension* d'un espace vectoriel est le nombre de vecteurs de base linéairement indépendants. Pouvez-vous définir ces termes plus précisément?

Défi 201 e

Un *espace!de Hilbert* est un espace vectoriel réel ou complexe muni d'un produit scalaire, qui est aussi un espace métrique *complet*. Autrement dit, dans un espace de Hilbert, les distances varient de façon continue et se comportent comme on peut s'y attendre naïvement. Les espaces de Hilbert ont en général, mais pas tout le temps, un nombre infini de dimensions.

La définition des espaces de Hilbert et des espaces vectoriels suppose dès le départ des ensembles continus. Si la nature n'était pas continue, pourrions-nous encore utiliser le concept?

Défi 202 e

Curiosités mathématiques et défis amusants

Les mathématiques produisent de nombreux résultats contre-intuitifs. La lecture d'un bon livre sur le sujet, tel que celui de Bernard R. Gelbaum & John M. H. Olmsted, *Theorems and Counterexamples in Mathematics*, Springer, 1993, peut vous aider à affiner votre esprit et à vous faire savourer encore plus la beauté des mathématiques.

* *

Il est possible de tracer une courbe qui passe par tous les points d'un carré ou par tous les points d'un cube. Ceci est démontré, par exemple, dans le texte de Hans Sagan, *Space Filling Curves*, Springer Verlag, 1994. Par conséquent, la distinction entre une, deux et trois dimensions n'est pas nette en mathématiques pures. En revanche, en physique, les dimensions sont bel et bien clairement définies: chaque objet de la nature a trois dimensions.

Défi 203 f

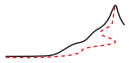
* *

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 204 pe Montrez que deux opérateurs A et B obéissent à

$$\begin{aligned} e^A e^B = \exp(A + B + \frac{1}{2}[A, B] \\ + \frac{1}{12}[[A, B], B] - \frac{1}{12}[[A, B], A] \\ - \frac{1}{48}[B, [A, [A, B]]] - \frac{1}{48}[A, [B, [A, B]]] \\ + \ldots) \end{aligned} \tag{152}$$

pour la plupart des opérateurs A et B. Ce résultat est souvent appelé la *formule de Baker-Campbell-Hausdorff* (ou *formule BCH*).



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Indices et solutions des défis

> Never make a calculation before you know the answer.*
>
> Devise de John Wheeler

Défi 1, page 10: N'hésitez pas à être exigeants et stricts. La prochaine édition du texte en bénéficiera.

Défi 2, page 18: La physique classique ne permet d'expliquer aucune des propriétés des matériaux, telle que la couleur ou la rugosité. Les propriétés des matériaux résultent des interactions de la nature et sont donc inévitablement quantiques. Les explications des propriétés des matériaux nécessitent, sans exception, l'utilisation des particules et de leurs propriétés quantiques.

Défi 3, page 19: La physique classique permet à n'importe quelle observable de changer sa valeur *de façon continue, sans échelons* au cours du temps. En physique classique, il n'y a pas de valeur minimale pour les grandeurs physiques observables.

Défi 4, page 21: Parce que l'action est une masse multipliée par une vitesse multipliée par une distance, plus la masse est élevée, moins le quantum d'action introduit de flou dans le mouvement: pour une masse importante, les variations sur la vitesse et sur la distance sont faibles.

Défi 5, page 22: La durée la plus simple est $\sqrt{G\hbar/c^5}$. Le facteur numérique n'est bien évidement pas établi et sera changé un peu plus tard. En utilisant $4G$ au lieu de G cette durée devient le plus petit intervalle de temps qu'il soit possible de mesurer dans la nature.

Défi 7, page 23: La charge de l'électron est particulière aux interactions électromagnétiques: elle ne prend pas en compte les interactions nucléaires ni la gravité. La raison pour laquelle la longueur définie avec la charge élémentaire e devrait être importante pour les systèmes neutres ou pour l'espace vide n'est pas clairement établie. D'un autre côté, le quantum d'action $\hbar$ est valide pour *toutes* les interactions et pour *toutes* les observations.

De plus, il est possible de soutenir que les deux options pour définir la longueur fondamentale (avec le quantum d'action ou avec le quantum de charge) ne sont pas si différentes l'une de l'autre: la charge de l'électron est liée au quantum d'action par la relation $e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 \alpha c \hbar}$. Les deux échelles de longueur définies par chacune des deux options diffèrent seulement par un facteur d'environ $11,7$. Il se trouve que les deux échelles sont des échelles *quantiques*.

Défi 8, page 23: Sur un plan purement dimensionnel, le rayon d'un atome doit être

$$r \approx \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} \,, \tag{153}$$

Page 211 ce qui fait environ 53 nm. Il se trouve que cette estimation est excellente: ce n'est autre que le rayon de Bohr.

* «Ne faites jamais de calcul avant de connaître la réponse».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Vol. I, page 338

Défi 9, page 23: À cause du quantum d'action, les atomes qui composent toutes les personnes, qu'elles soient géantes ou minuscules, ont la même taille. Ceci implique que les géants ne peuvent pas exister, comme l'avait déjà démontré Galilée. L'argument est basé sur la robustesse conférée aux matériaux, et sur le fait qu'une robustesse qui serait identique en tout point équivaut à des propriétés des atomes identiques en tout point. Que des personnes minuscules ne puissent pas exister est dû à une raison similaire: la nature n'est pas capable de faire les gens plus petits qu'à l'ordinaire (même dans l'utérus, ils diffèrent remarquablement des adultes) car cela nécessiterait des atomes plus petits.

Défi 12, page 30: La disparition d'une masse m pendant une durée Δt correspond à un changement d'action $c^2 m \Delta t$. Ce qui est bien plus que $\hbar$ pour tous les objets de la vie quotidienne.

Défi 14, page 32: Un lion qui s'échapperait par effet tunnel aurait besoin d'une action dont la valeur serait de l'ordre de $S = 100\,\mathrm{kgm^2/s} \gg \hbar$. Ceci ne peut pas se produire spontanément.

Défi 15, page 32: Toutes les mémoires, que ce soit la mémoire humaine ou bien une mémoire électronique d'ordinateur, doivent éviter de se désintégrer. Et les désintégrations ne peuvent être limitées que par l'utilisation de barrières élevés et par des taux d'effet tunnel faibles.

Défi 16, page 33: Oui! Beaucoup de croyances et de mythes, depuis la loterie jusqu'aux fantômes, sont le résultat d'avoir négligé les effets quantiques.

Défi 17, page 33: Un écoulement parfaitement continu est contradictoire avec le flou du mouvement induit par le quantum d'action.

Défi 18, page 34: L'impossibilité de suivre deux particules le long de leur trajectoire apparaît lorsque leur distance mutuelle d est plus petite que l'indétermination sur leur position du fait de leur quantité de mouvement relative p, donc lorsque $d < \hbar/p$. Vous pouvez vérifier les valeurs pour les électrons, les atomes, les molécules, les bactéries, les gens et les galaxies.

Défi 19, page 34: Les photons sont, eux aussi, indistinguables. Voir page 70.

Défi 21, page 40: Dans les matériaux qui composent le mécanisme de l'échappement.

Défi 22, page 40: La croissance n'est pas proportionnelle à l'intensité lumineuse ni à sa fréquence, mais présente des *seuils* d'intensité et de fréquence. Ceux-ci sont des effets quantiques.

Défi 23, page 40: Tous les effets mentionnés jusqu'ici, tels que l'effet tunnel, les interférences, la désintégration, les transformations, le fait que l'espace vide ne soit pas vide, l'indétermination et le caractère aléatoire s'observent également dans le domaine du nucléaire.

Défi 24, page 40: Ceci n'est pas évident au regard de ce que l'on vient de dire, mais il se trouve que c'est correct. En fait, il n'y a pas d'autre alternative, comme vous le constaterez si vous essayez d'en trouver une.

Défi 25, page 41: Tom Pouce est supposé être aussi intelligent que les êtres humains de taille normale. Mais le cerveau ne peut pas être miniaturisé. Les fractales contredisent l'existence de la longueur de Planck et la loi de Moore contredit l'existence des atomes.

Défi 26, page 41: C'est le moment cinétique total qui compte, et il inclut le moment cinétique orbital. Le moment cinétique orbital $\boldsymbol{L}$ est donné par, en utilisant le rayon et la quantité de mouvement, $\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p}$. Le moment cinétique total est un multiple de $\hbar$.

Défi 27, page 41: Oui, nous aurions pu le faire!

Défi 28, page 41: C'est tout simplement la relation d'indétermination. Bohr développa cette idée pour l'appliquer à toutes sortes d'autres paires de concepts, plutôt dans le domaine philosophique, tel que la clarté et la précision des explications: elles ne peuvent pas être toutes les deux élevées en même temps.

Défi 29, page 43: Par exemple, le big-bang n'a pas pu être un évènement.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

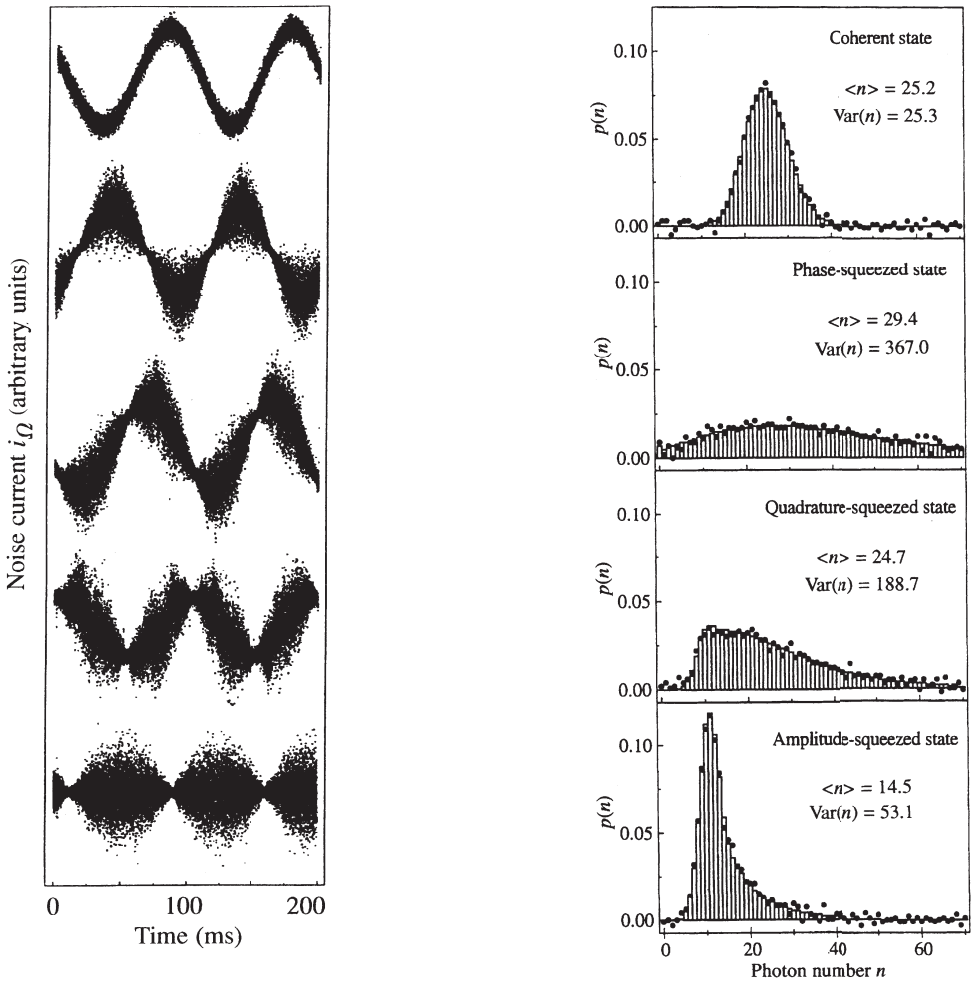


FIGURE 90 À gauche, de haut en bas: le champ électrique et son flou mesurés dans le cas d'un état cohérent, d'un état de vide compressé, d'un état compressé en phase, d'un état mixte et compressé en quadrature et d'un état compressé en amplitude, tous avec un petit nombre de photons. À droite: les distributions du nombre de photons correspondant à quatre de ces états. (© G. Breitenbach/Macmillan, reproduit de Ref. 19)

Défi 32, page 49: Des photons chargés seraient déviés par les champs électriques ou magnétiques. En particulier, ils ne se croiseraient pas sans être perturbés. Ce n'est pas ce que l'on observe. Des photons massiques seraient déviés par d'autres masses, telles que celle du Soleil, beaucoup plus que ce que l'on observe.

Défi 34, page 50: Pour mesurer la quantité de mouvement on a besoin d'un instrument de mesure qui soit étendu spatialement. Pour mesurer la position on a besoin d'un instrument de mesure localisé.

Défi 35, page 52: Les photons sont élémentaires parce qu'ils vérifient l'action minimale, parce qu'ils ne peuvent pas se désintégrer, parce qu'ils ne peuvent pas être déformés ni divisés, parce qu'ils n'ont pas de masse, pas de charge électrique et pas d'autres nombres quantiques, et parce qu'ils apparaissent dans le Lagrangien de l'électrodynamique quantique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 36, page 55: Les champs électriques et la distribution de photons que l'on mesure sont représentés sur les graphes célèbres reproduits sur la Figure 90.

Défi 38, page 56: Ceci est un problème qui n'est pas posé de façon claire. Le rayonnement est thermique, mais le nombre de photons dépend du volume considéré.

Défi 40, page 62: Les photons radio peuvent être comptés en utilisant des expériences de pompage optique au cours desquelles les états des atomes sont séparés, à l'aide de champs magnétiques, par des petites quantités d'énergies. De même, les horloges atomiques au césium détectent les photons radio par des moyens optiques. L'effet Josephons et l'imagerie par résonance magnétique sont d'autres méthodes de détection des photons radio.

Défi 41, page 64: Pour pouvoir être observées à l'œil nu, les franges d'interférences doivent restées visibles pendant environ 0, 1 s. Cela implique une différence de fréquence maximale d'environ 10 Hz entre les deux faisceaux. Ceci est réalisable uniquement si le même faisceau est partagé en deux, ou si les deux faisceaux proviennent de lasers stabilisés et de haute précision.

Défi 42, page 69: L'idée qu'une seule particule quantique soit décrite par une seule flèche est implicite dans le modèle des flèches.

Défi 48, page 71: Malgré un grand nombre de tentatives, et la promesse d'une renommée éternelle, ceci est la conclusion la plus raisonnable.

Défi 53, page 77: Oui, l'argument est correct. En fait, des discussions plus détaillées montrent que l'électrodynamique classique est en contradiction avec *toutes* les couleurs que l'on observe dans la nature.

Ref. 178 **Défi 57**, page 82: Le calcul n'est pas facile, mais pas trop difficile non plus. À partir d'une orientation initiale *proche* de la verticale, il se trouve que le temps de chute T est

$$T = \frac{1}{2\pi} T_0 \ln \frac{8}{\alpha} \,, \tag{154}$$

où α est l'angle de départ, et où l'on suppose une chute d'un angle π. Ici, T_0 est la période d'oscillation du crayon pour les petits angles. (Pouvez-vous la déterminer?) La relation d'indétermination pour la pointe du crayon conduit à un angle de départ *minimal*, parce qu'il n'est pas possible de rendre l'indétermination sur la quantité de mouvement arbitrairement grande. Vous devriez pouvoir en fournir une limite supérieure. Une fois que cet angle est connu, vous pouvez calculer le temps maximal.

Défi 58, page 83: Utilisez la température pour calculer l'énergie cinétique moyenne, et ensuite la vitesse moyenne des atomes.

Défi 59, page 83: À des températures aussi basses, les atomes ne peuvent pas être entièrement distingués, ils forment un état de la matière aux propriétés bizarres, que l'on appelle un *condensat*. Le condensat n'est pas au repos non plus, mais à cause de sa grande masse, ses fluctuations sont considérablement réduites si on les compare à celles d'un seul atome.

Défi 61, page 88: Seules des variables dont le produit a les mêmes unités que l'action physique (Js) peuvent être complémentaires l'une de l'autre.

Défi 62, page 89: Utilisez $\Delta E < E$ et $a\,\Delta t < c$.

Défi 67, page 96: Le quantum d'action ne s'applique pas uniquement aux mesures, il s'applique au mouvement lui-même, et en particulier, à tous les mouvements. Les effets des forces nucléaires, des particules nucléaires et des particules de rayonnement nucléaire doivent également se conformer à la limite. Et les expériences montrent que c'est en effet le cas. En fait, si elles ne s'y conformaient pas, il serait possible de se dispenser du quantum d'action dans les situations électrodynamiques, comme vous pouvez le vérifier.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 74, page 108: À l'extérieur du garage, tous les atomes doivent à nouveau former la même structure solide.

Défi 75, page 109: Les puces électroniques d'un téraoctet auraient besoin de petites cellules mémoire. Des petites cellules impliquent des barrières minces. Des barrières minces impliquent des probabilités d'effet tunnel élevées. L'effet tunnel implique la perte de mémoire.

Défi 81, page 121: Si une particule n'était pas élémentaire, ces constituants seraient liés par une interaction. Mais il n'y a aucune interaction connue en dehors de celles décrites par le modèle standard.

Défi 82, page 122: Les difficultés que l'on rencontre lorsque l'on essaye de voir les atomes d'hydrogène sont dues à leur petite taille et à leur petit nombre d'électrons. Pour ces raisons, les atomes d'hydrogène produisent des contrastes faibles lors d'imagerie par rayons X. De même, il est difficile de les visualiser en utilisant des électrons: le rayon de Bohr de l'hydrogène est à peine plus grand que la longueur d'onde de Compton de l'électron.

Pour la première fois, en 2008, un groupe de recherche a prétendu avoir visualisé des atomes d'hydrogène absorbés sur du graphène à l'aide d'un microscope électronique en transmission. Pour plus de détails, voir J. C. Meyer, C. O. Grit, M. F. Crommle & A. Zetti, *Imaging and dynamics of light atoms and molecules on graphene*, Nature **454**, pp. 319–322, 2008. Cependant, il semblerait que l'information n'ait pas encore été confirmée par un autre groupe. D'autres images d'hydrogène sont apparues ces dernières années. Vous pourrez par exemple rechercher olympicène sur internet. Pour un autre résultat récent concernant des images de l'hydrogène, Page 211 voir ci-dessus.

Défi 84, page 123: Ceci n'est pas simple! Pouvez-vous utiliser le concept d'action pour montrer qu'il existe en effet une différence fondamentale entre des opérateurs très semblables et des opérateurs très différents?

Défi 86, page 123: $r = 86\,\mathrm{pm}$, donc $T = 12\,\mathrm{eV}$. Ceci est comparable à la valeur actuelle de $13,6\,\mathrm{eV}$. L'astuce pour dériver la formule est d'utiliser $\langle\psi\,|\,r_x^2\,|\,\psi\rangle = \frac{1}{3}\langle\psi\,|\,\boldsymbol{rr}\,|\,\psi\rangle$, une relation valable pour les états sans moment cinétique orbital. Elle est valable pour toutes les coordonnées et également pour les trois observables de la quantité de mouvement, tant que le système n'est pas relativiste.

Défi 87, page 124: Une fluctuation quantique nécessiterait que l'Univers existe déjà. De telles affirmations, que l'on trouve régulièrement dans la presse, sont complètement absurdes.

Défi 88, page 126: Des particules ponctuelles ne peuvent pas être marquées et des particules ponctuelles proches ne peuvent pas être distinguées, à cause du quantum d'action.

Défi 89, page 126: La solution est de *deux* gants. Dans la situation initiale, si deux hommes et deux femmes veulent faire l'amour sans danger, en théorie, ils n'ont besoin que de *deux* préservatifs.

Défi 94, page 128: Le meilleur moyen de déduire la formule de Sackur-Tetrode est le suivant. On part d'un gaz parfait monochromatique de volume V, comportant N particules et ayant une énergie totale U. Dans l'espace des phases, la *fonction de partition* Z est donnée par

$$Z = \frac{V^N}{N!}\frac{1}{\Lambda^{3N}}\,. \tag{155}$$

Nous avons utilisé l'approximation de Stirling pour $N! \approx N^N/e^N$, ainsi que la définition de l'entropie par $S = \partial(kT\ln Z)/\partial T$. En introduisant la définition de Λ, on obtient l'équation de Sackur-Tetrode.

Défi 96, page 132: Pour pouvoir écrire noir sur blanc quelque choses à propos de deux particules, il est nécessaire de les distinguer, même si la distinction est arbitraire.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 99, page 138: Cette idée, que l'on appelle aussi l'*argent quantique*, n'est pas compatible avec les exigences de taille et de durée d'existence des vrais billets de banque.

Défi 100, page 139: Les jumeaux diffèrent par la façon dont leurs intestins sont repliés, par les lignes de leurs mains et par d'autres replis de leur peau. Parfois, mais pas toujours, certains traits, comme les points noirs de la peau, sont inversés par symétrie miroir entre les deux jumeaux.

Défi 109, page 153: Trois.

Défi 110, page 153: Pas avec un matelas. Ceci n'est pas facile à se représenter.

Défi 111, page 154: Les anges sont distinguables par leur nom; ils peuvent parler et ils peuvent chanter. Ils sont donc constitués d'un grand nombre de fermions. Il se trouve que de nombreux anges ont une taille humaine, de sorte qu'ils ne peuvent même pas se tenir sur la pointe d'une épingle.

Défi 117, page 159: Un boson peut être représenté comme un objet collé à un fil infiniment fin dont les deux queues s'étendent à l'infini.

Défi 118, page 159: Les arbres, comme tous les objets macroscopiques, ont une valeur de spin qui dépend de leur moment cinétique. Étant des objets classiques, dont la phase peut être observée, la valeur de leur spin est incertaine. Cela n'a aucun sens de se demander si les arbres ou les autres objets macroscopiques sont des bosons ou des fermions, car ce ne sont pas des quantons.

Défi 121, page 161: Les fantômes, comme les anges, sont distinguables par leur nom; ils peuvent parler et il est possible de les voir. C'est donc qu'ils contiennent des fermions. Cependant, ils peuvent passer à travers les murs et ils sont transparents. Ils ne peuvent donc pas être constitués de fermions, mais doivent être des images, constituées de bosons. Ceci est une contradiction.

Défi 122, page 164: Il n'est pas possible de dessiner des superpositions macroscopiques, car l'observation implique une interaction avec un thermostat, ce qui détruit la superposition macroscopique.

Défi 124, page 166: La perte des éléments non diagonaux conduit à une augmentation des éléments de la diagonale, et donc de l'entropie.

Défi 127, page 173: La vitesse de l'énergie est donnée par la progression des deux queues extérieures. Cette vitesse n'est jamais plus grande que la vitesse de la lumière.

Défi 128, page 176: Non, parce que prendre une photo implique une interaction avec un thermostat, ce qui détruirait la superposition. Pour plus de détails: une photographie nécessite un éclairage; un éclairage est un champ électromagnétique macroscopique; un champ macroscopique est un thermostat; un thermostat implique la décohérence; la décohérence détruit les superpositions.

Défi 131, page 178: Cela dépend. Elles peuvent être dues à des interférences ou à des sommes d'intensités. Dans le cas de la radio, l'effet est plus simple à comprendre. Si, à une fréquence particulière, le signal change périodiquement entre une station et une autre, on a un effet d'interférence bien réel.

Défi 132, page 178: Ils interfèrent. Mais c'est une question piège: qu'est-ce qu'un électron monochromatique? Est-il possible d'en produire en laboratoire?

Défi 133, page 178: Un tel ordinateur nécessite des relations de phase bien déterminées entre ses composants. De telles relations de phase sont extrêmement sensibles aux perturbations extérieures. À l'heure actuelle, elles ne tiennent pas plus d'une centaine de microsecondes, alors que les programmes informatiques les plus longs nécessitent des minutes voire des heures pour s'exécuter.

Défi 134, page 178: Un enregistrement est un effet produit par un processus qui doit être *difficile à inverser ou à défaire*. Les traces laissées par un œuf cassé sont faciles à enlever lorsqu'elles

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont sur une grande assiette en verre, mais difficiles si elles sont dans la laine d'un mouton. Des dents cassées, des vêtements déchirés, ou des rayures sur une grande surface sont de bons enregistrements. Les médecins légistes connaissent de nombreux autres exemples.

Défi 138, page 187: N'importe quel autre thermostat fera également l'affaire, comme l'atmosphère, des vibrations sonores, un champ électromagnétique, etc.

Défi 139, page 188: La Lune est en contact avec des thermostats tels que le vent solaire, les chutes de météorites, le rayonnement de fond diffus électromagnétique de l'Univers, le flux de neutrinos provenant du Soleil, le rayonnement cosmique, etc.

Défi 140, page 190: Les potentiels périodiques dans l'espace ont cette propriété. La décohérence conduit alors à la diagonalisation de la quantité de mouvement.

Défi 142, page 195: Si vous en trouvez une, faites-le savoir à l'auteur.

Défi 143, page 207: La valeur du décalage vers le rouge est $z = 9,9995$. À partir de la formule du décalage Doppler longitudinal on obtient $v/c = ((z+1)^2 - 1)/((z+1)^2 + 1)$, ce qui donne $0,984$ dans le cas présent. La galaxie s'éloigne donc de la Terre à 98,4 % de la vitesse de la lumière.

Défi 149, page 210: Les atomes d'hydrogène sont dans des états propres pour les raisons expliquées au chapitre sur les superpositions et les probabilités: dans un gaz, les atomes font partie d'un thermostat, et ainsi, sont presque toujours dans des états propres de l'énergie.

Défi 154, page 221: Si plusieurs faisceaux lumineux sont focalisés dans l'espace compris entre les miroirs, et si la fréquence des faisceaux lumineux est correctement ajustée par rapport aux fréquences d'absorption des atomes, les atomes subiront une force de rappel chaque fois qu'ils tentent de s'éloigner de la région de focalisation. En faisant converger des faisceaux lumineux vers la région de focalisation depuis six directions, les atomes sont piégés. La technique du refroidissement des atomes par laser est aujourd'hui largement utilisée dans les laboratoires de recherche.

Défi 155, page 222: Non, malgré son nom, le phosphore n'est pas phosphorescent, mais il est chimioluminescent.

Défi 157, page 223: C'est une question piège. Un changement de la valeur de α nécessite un changement de la valeur de c, de $\hbar$, de e ou de ε_0. Aucun de ces changements n'est possible, ni observable, car tous nos appareils de mesure sont basés sur ces unités. Les spéculations sur le changement de α, malgré leur fréquentes apparitions dans la presse et dans les revues scientifiques, sont des paroles vaines.

Défi 158, page 223: Un changement des unités physique tel que $\hbar = c = e = 1$ changerait la valeur de ε_0 de sorte que $4\pi\varepsilon_o = 1/\alpha \approx 137,036$.

Défi 161, page 235: La masse est une mesure de la quantité d'énergie. Le «carré de la masse» n'a pas de sens.

Défi 165, page 238: Les limites de Planck peuvent être dépassées pour des observables extensives pour lesquelles les systèmes composés de nombreuses particules peuvent dépasser les limites d'une particule unique, tel que la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ou la résistance électrique.

Défi 167, page 240: N'oubliez pas la dilatation relativiste du temps.

Défi 168, page 241: La formule avec $n - 1$ convient mieux. Pourquoi?

Défi 171, page 242: Non! Ils sont beaucoup trop précis pour paraître sensés. Nous les donnons uniquement en guise d'illustration pour le comportement de la distribution gaussienne. En réalité, les distributions de mesures ne sont pas gaussiennes si on considère le niveau de précision que ces nombres impliquent.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 172, page 243: Environ 0, 3 m/s. Ce n'est *pas* 0, 33 m/s, ce n'est *pas* 0, 333 m/s et ce n'est *aucune* suite de trois plus longue.

Défi 174, page 249: Le ralentissement évolue avec le temps *de façon quadratique*, parce que chaque nouveau ralentissement en rajoute au précédent!

Défi 175, page 249: Non, seules des propriétés portant sur des parties de l'Univers y sont énumérées. L'Univers lui-même n'a pas de propriétés, comme nous le verrons dans le dernier volume.

Vol. VI, page 112

Défi 176, page 251: Le double de ce nombre, le nombre construit avec la suite de tous les nombres pairs, etc.

Défi 179, page 254: Nous découvrirons dans le dernier volume que tous les résultats de mesures ont des majorants et des minorants. Nous découvrirons également que deux résultats de mesure physique ne peuvent tout simplement pas différer à partir de, disons, la 300ième position décimale. Donc tous les résultats de mesure sont bien des nombres réels, mais l'inverse n'est pas vrai. Il nous faut toutefois insister qu'en ce qui concerne la théorie quantique, la relativité et la physique de Galilée, cette restriction n'a, de toutes façons, aucune conséquence.

Défi 181, page 256: $|z|^2$ est le *déterminant* de la matrice $z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$.

Défi 186, page 257: Utilisez l'argument de la diagonale de Cantor comme pour le défi 274 du volume III.

Défi 187, page 258: Tout quaternion $X = ai + bj + ck$ avec $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ résout l'équation $X^2 + 1 = 0$. Aux solutions purement imaginaires $+i$ et $-i$ s'ajoutent donc une sphère continue de solutions dans l'espace des quaternions.

Défi 190, page 260: Toute rotation d'angle 2π est décrite par -1. Seule une rotation d'angle 4π est décrite par $+1$. Les quaternions décrivent donc bien les spineurs.

Défi 192, page 262: Vérifiez simplement le résultat une composante après l'autre. Voir également la référence mentionnée.

Défi 194, page 264: Non. Parce que les octonions unitaires ne sont pas associatifs pour la multiplication, ils ne forment même pas un groupe. Outre son attrait superficiel, cette ligne de raisonnement n'a conduit à aucune avancée quant à la nature des interactions fondamentales.

Défi 195, page 265: Pour qu'un entier de Gauss $n + im$ soit premier, l'entier $n^2 + m^2$ doit être premier, et en plus, une condition sur n mod 3 doit être satisfaite. (Laquelle et pourquoi?)

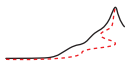
Défi 197, page 266: L'ensemble contenant uniquement le vecteur nul.

Défi 198, page 266: La métrique est régulière, définie positive et obéit à l'inégalité triangulaire.

Défi 200, page 268: Essentiellement, ce sont uniquement les espaces vectoriels qui sont énumérés dans l'annexe (ou dans le livre).

Défi 201, page 268: Si vous ne le pouvez pas, il faut le reprocher à votre prof de math de lycée, puis regardez les définitions. Ce n'est pas un sujet difficile.

Défi 202, page 268: Des espaces pourraient exister de façon approximative, en tant que moyennes de structures non continues. Cette idée est en cours d'exploration par la recherche moderne. Un exemple sera donné dans le dernier volume de cette série.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Bibliographie

> No man but a blockhead ever wrote except for money.*
>
> Samuel Johnson

> As soon as you write, no time to read remains.**
>
> Anonymous

1 Giuseppe Fumagalli, *Chi l'ha detto?*, Hoepli, Milano, 1983. Cité à la page 16.

2 Le quantum d'action a été introduit dans Max Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin pp. 440–480, 1899. Dans l'article, Planck utilisait la lettre *b* pour ce que l'on nomme aujourd'hui *h*. Cité à la page 18.

3 Bohr avait expliqué l'indivisibilité du quantum d'action dans sa célèbre conférence de Côme. Voir N. Bohr, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Springer, 1931. À la page 16 il écrivait: «Il n'est pas davantage probable que les concepts fondamentaux des théories classiques deviennent un jour superflus pour la description de l'expérience physique. Non seulement la reconnaissance de l'indivisibilité du quantum d'action et la détermination de sa grandeur dépendent d'une analyse des mesures basée sur des concepts classiques, mais c'est toujours l'application de ces seuls concepts qui permet de relier le symbolisme de la théorie quantique aux données de l'expérience.» Il écrivait également: «...le postulat fondamental de l'indivisibilité du quantum d'action est lui-même, du point de vue classique, un élément irrationnel qui nous oblige inévitablement à renoncer à un mode de description causal et qui, du fait du couplage entre les phénomènes et leur observation, nous oblige à adopter un nouveau mode de description désigné comme complémentaire, en ce sens que toute application de concepts classiques exclut l'utilisation simultanée d'autres concepts classiques qui, sous un rapport différent, sont tout aussi nécessaires à l'élucidation des phénomènes ...» et «...la grandeur non infiniment nulle du quantum d'action empêche complètement qu'il puisse être fait une distinction nette entre un phénomène et le mécanisme par lequel il est observé, distinction qui sous-tend le concept coutumier d'observation et, par conséquent, constitue la base des idées classiques du mouvement.» D'autres déclarations sur l'indivisibilité du quantum d'action se trouvent dans N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, 1961. Voir également Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, first edition, 1974, pp. 90–91. Cité à la page 19.

4 Pour quelques-unes des rares publications modernes mettant en avant le quantum d'action, voir M. B. Mensky, *The action uncertainty principle and quantum gravity*, Physics Letters A **162**, p. 219, 1992, et M. B. Mensky, *The action uncertainty principle in continuous*

* «Aucun homme, à part un imbécile, n'a jamais écrit si ce n'est pour de l'argent.»

** «Dès que l'on écrit, il ne reste plus de temps pour lire.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

quantum measurements, Physics Letters A **155**, pp. 229–235, 1991. Le principe de l'action quantique de Schwinger est également utilisé dans Richard F. W. Bader, *Atoms in Molecules – A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

Il existe un grand nombre de manuels généraux sur la théorie quantique. Il y en a pour tous les goûts.

Une introduction *conceptuelle* bien connue est Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar, *Quantique – Rudiments*, Masson, 1997, traduite en anglais sous le titre *Quantics*, North-Holland, 1990.

Un des plus beaux livres est Julian Schwinger, *Quantum Mechanics – Symbolism of Atomic Measurements*, édité par Berthold-Georg Englert, Springer Verlag, 2001.

Une approche moderne avec une belle introduction est Max Schubert & Gerhard Weber, *Quantentheorie – Grundlagen und Anwendungen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1993.

Un texte standard pour débutant est C. Cohen-Tannoudji, B. Diu & F. Laloë, *Mécanique quantique I et II*, Hermann, Paris, 1977. Il est également disponible en plusieurs autres langues.

Un bon texte est Asher Peres, *Quantum Theory – Concepts and Methods*, Kluwer, 1995.

Pour une approche vivante, voir Vincent Icke, *The Force of Symmetry*, Cambridge University Press, 1994.

De nouveaux manuels sont publiés régulièrement partout dans le monde. Cité aux pages 19 et 287.

5 La meilleure source concernant l'histoire de la promenade en forêt de Planck avec son fils Erwin est de Hans Roos & Armin Hermann, editors, *Max Planck – Vorträge, Reden, Erinnerungen*, Springer, 2001, page 125. Comme l'explique le texte, l'histoire avait été racontée par Erwin Planck à au moins deux personnes différentes. Erwin Planck lui-même avait fait partie du complot manqué contre Hitler en 1944 et fut pendu en janvier 1945. Cité à la page 22.

6 Max Born, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (vorläufige Mitteilung)*, Zeitschrift für Physik **37**, pp. 863–867, 1926, et Max Born, *Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeitschrift für Physik **38**, pp. 803–827, 1926. Cité à la page 26.

7 Voir par exemple les articles de Jan Hilgevoord, *The uncertainty principle for energy and time*, American Journal of Physics **64**, pp. 1451–1456, 1996, et de Paul Busch, *On the time–energy uncertainty reaction, parts 1 & 2*, Foundations of Physics **20**, pp. 1–43, 1990. Un classique est l'article de Eugene P. Wigner, *On the time–energy uncertainty relation*, dans Abdus Salam & Eugene P. Wigner, éditeurs, *Aspects of Quantum Theory*, Cambridge University Press, 1972. Cité à la page 28.

8 Voir également le livret de Claus Mattheck, *Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik*, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003. Cité à la page 32.

9 R. Clifton, J. Bub & H. Halvorson, *Characterizing quantum theory in terms of information-theoretic constraints*, arxiv.org/abs/quant-ph/0211089. Cité à la page 39.

10 Cette façon de voir les boites de haricots remonte au texte de Susan Hewitt & Edward Subitzky, *A call for more scientific truth in product warning labels*, Journal of Irreproducible Results **36**, nr. 1, 1991. Cité à la page 41.

11 J. Malik, *The yields of the Hiroshima and Nagasaki nuclear explosions*, Technical Report LA-8819, Los Alamos National Laboratory, September 1985. Cité à la page 42.

12 Les citations sur le mouvement se trouvent au chapitre VI de F. Engels, *Herrn Eugen Dührings Umwälzung der Wissenschaft*, Verlag für fremdsprachliche Literatur, 1946. Le livre

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

est communément appelé *Anti-Dühring*. Cité aux pages 43 et 83.

13 Rodney Loudon, *The Quantum Theory of Light*, Oxford University Press, 2000. Cité à la page 44.

14 E. M. Brumberg & S. I. Vavilov, Izvest. Akad. Nauk. Omen Ser. 7, p. 919, 1933. Cité à la page 44.

15 Pour la détection des photons par l'œil humain, voir la revue de synthèse influente de F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics **70**, pp. 1027–1036, 1998. On peut la trouver sur internet au format pdf. Cité à la page 47.

16 F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics **70**, pp. 1027–1036, 1998. Ils mentionnent également que l'œil fonctionne habituellement pour des flux de photons compris entre 10^8 /μm^{2}s (lumière du Soleil) et 10^{-2} /μm^{2}s (lumière des étoiles). Les cônes de la rétine détectent (en couleur) les intensités lumineuses correspondant aux sept ou huit ordres de grandeur les plus élevés, tandis que les bâtonnets détectent (en noir et blanc) les intensités lumineuses les plus faibles. Cité aux pages 48 et 49.

17 E. Fischbach, H. Kloor, R. A. Langel, A. T. Y. Lui & M. Peredo, *New geomagnetic limit on the photon mass and on long-range forces coexisting with electromagnetism*, Physical Review Letters **73**, pp. 514–517, 1994. Cité à la page 49.

18 A. H. Compton, *The scattering of X-rays as particles*, American Journal of Physics **29**, pp. 817–820, 1961. Ceci est une présentation pédagogique des découvertes qu'il fit en 1923. Cité à la page 50.

19 L'article de référence sur le sujet est G. Breitenbach, S. Schiller & J. Mlynek, *Measurement of the quantum states of squeezed light*, **387**, pp. 471–475, 1997. Il est disponible gratuitement sur gerdbreitenbach.de/publications/nature1997.pdf. Cité aux pages 54 et 272.

20 L'article célèbre est R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature **178**, p. 1046, 1956. Ils ont eu l'idée de mesurer la lumière de cette façon à la suite d'un de leurs précédents travaux qui utilisait la même méthode avec des ondes radio: R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature **177**, p. 27, 1956. La discussion complète se trouve dans leurs articles R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation*, Proceedings of the Royal Society A **242**, pp. 300–324, 1957, et dans R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. II. An experimental test of the theory for partially coherent light*, Proceedings of the Royal Society A **243**, pp. 291–319, 1958. Ils sont téléchargeables tous les deux gratuitement depuis internet et valent la peine d'être lus. Cité à la page 58.

21 J. Glanz, *First light from a space laser*, Science **269**, p. 1336, 1995. Cité à la page 59.

22 A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*, Annalen der Physik **17**, pp. 132–184, 1905. Cité à la page 60.

23 Voir le résumé de P. W. Milonni, *Answer to question 45: What (if anything) does the photoelectric effect teach us?*, American Journal of Physics **65**, pp. 11–12, 1997. Cité à la page 61.

24 Pour une description détaillée, voir J. J. Prentis, *Poincaré's proof of the quantum discontinuity of nature*, American Journal of Physics **63**, pp. 339–350, 1995. Les articles originaux sont Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Comptes Rendus de l'Académie des

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Sciences (Paris) **153**, pp. 1103–1108, 1911, et Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Journal de Physique (Paris) **2**, pp. 5–34, 1912. Cité à la page 61.

25 J. Jacobson, G. Björk, I. Chang & Y. Yamamoto, *Photonic de Broglie waves*, Physical Review Letters **74**, pp. 4835–4838, 1995. Le premier résultat de mesure a été publié par E. J. S. Fonseca, C. H. Monken & S. de Pádua, *Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet*, Physical Review Letters **82**, pp. 2868–2671, 1995. Cité à la page 61.

26 Pour l'état de trois photons, voir M. W. Mitchell, J. S. Lundeen & A. M. Steinberg, *Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state*, Nature **429**, pp. 161–164, 2004, et pour l'état de quatre photons, voir, dans la même édition, P. Walther, J.-W. Pan, M. Aspelmeyer, R. Ursin, S. Gasparoni & A. Zeilinger, *De Broglie wavelength of a non-local four-photon state*, Nature **429**, pp. 158–161, 2004. Cité à la page 61.

27 Pour une introduction sur la lumière compressée, voir L. Mandel, *Non-classical states of the electromagnetic field*, Physica Scripta T **12**, pp. 34–42, 1986. Cité à la page 62.

28 Friedrich Herneck, *Einstein und sein Weltbild: Aufsätze und Vorträge*, Buchverlag Der Morgen, 1976, page 97. Cité à la page 63.

29 La citation célèbre à propos de l'interférence d'un seul photon se trouve à la page 9 du manuel célèbre et de toute beauté, mais difficile, P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, 1930. Le phénomène est également abordé, de façon quelque peu confuse, dans l'article par ailleurs informatif de H. Paul, *Interference between independent photons*, Reviews of Modern Physics **58**, pp. 209–231, 1986. Cité aux pages 66 et 74.

30 Il y a trois articles originaux sur les états cohérents: R. J. Glauber, *The quantum theory of optical coherence*, Physical Review **130**, pp. 2529–2539, 1963, J. R. Klauder, *Continuous-representation theory*, I and II, Journal of Mathematical Physics **4**, pp. 1055–1058, 1963, et E. C. G. Sudarshan, *Equivalence of semiclassical and quantum mechanical descriptions of statistical light beams*, Physical Review Letters **10**, p. 227, 1963. Cité à la page 70.

31 Voir par exemple le texte merveilleux Richard P. Feynman, *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, pp. 73–75, Princeton University Press, 1988, ou Richard P. Feynman & Steven Weinberg, *Elementary Particles and the Laws of Physics*, p. 23, Cambridge University Press 1987. Cité à la page 70.

32 Wolfgang Tittel, J. Brendel, H. Zbinden & N. Gisin, *Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart*, Physical Review Letters **81**, pp. 3563–3566, 26 October 1998. Cité à la page 71.

33 N. Bohr & L. Rosenfeld, *Zur Frage der Meßbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen*, Mat.-fys. Medd. Danske Vid. Selsk. **12**, p. 8, 1933. Les résultats ont été publiés plus tard en anglais dans N. Bohr & L. Rosenfeld, *Field and charge measurements in quantum electrodynamics*, Physical Review **78**, pp. 794–798, 1950. Cité à la page 73.

34 Des affirmations trompeuses sont données dans l'introduction et dans la conclusion de la revue de synthèse de H. Paul, *Interference between independent photons*, Review of Modern Physics **58**, pp. 209–231, 1986. Cependant, dans le corps de l'article, l'auteur rétracte pratiquement la déclaration (à la page 221). Cité à la page 74.

35 G. Magyar & L. Mandel, *Interference fringes produced by superposition of two independent maser light beams*, Nature **198**, pp. 255–256, 1963. Cité à la page 74.

36 R. Kidd, J. Aedini & A. Anton, *Evolution of the modern photon*, American Journal of Physics **57**, pp. 27–35, 1989, Cité à la page 79.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

37 L'ensemble des atomes se comporte comme une seule molécule; on parle d'un condensat de Bose-Einstein. Les premières observations, dignes d'un prix Nobel, ont été faites par M.H. Anderson & al., *Observation of Bose–Einstein condensation in a dilute atomic vapour*, Science **269**, pp. 198–201, 1995, par C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett & R. G. Hulet, *Evidence of Bose–Einstein condensation in an atomic gas with attractive interactions*, Physical Review Letters **75**, pp. 1687–1690, 1995, et par K. B. Davis, M. -O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn & W. Ketterle, *Bose–Einstein condensation in a gas of sodium atoms*, Physical Review Letters **75**, pp. 3969–3973, 1995. Pour une introduction simple, voir W. Ketterle, *Experimental studies of Bose–Einstein condensation*, Physics Today pp. 30–35, December 1999. Cité à la page 83.

38 J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. García-Mochales & P. A. Serena, *Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: a universal property of metals*, Surface Science Letters **342**, pp. L1144–L1152, 1995. Voir également J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. A. Serena, P. García-Mochales, M. Marqués & A. Correia, *Conductance quantization in nanowires formed in macroscopic contacts*, Physical Review B p. 4416, 1997. Cité à la page 84.

39 Les belles expériences de premier cycle universitaire rendues possibles par cette découverte sont décrites dans E. L. Foley, D. Candela, K. M. Martini & M. T. Tuominen, *An undergraduate laboratory experiment on quantized conductance in nanocontacts*, American Journal of Physics **67**, pp. 389–393, 1999. Cité aux pages 84 et 85.

40 L. de Broglie, *Ondes et quanta*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences **177**, pp. 507–510, 1923. Cité à la page 85.

41 C. Jönsson, *Interferenz von Elektronen am Doppelspalt*, Zeitschrift für Physik **161**, pp. 454–474, 1961, et C. Jönsson, *Electron diffraction at multiple slits*, American Journal of Physics **42**, pp. 4–11, 1974. À cause de la charge des électrons, cette expérience n'est pas facile à réaliser: toutes les parties du montage qui sont isolantes se chargent et déforment l'image. C'est pourquoi l'expérience a été réalisée avec des électrons beaucoup plus tard qu'elle ne l'a été avec des atomes, des neutrons et des molécules. Cité à la page 87.

42 M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw & A. Zeilinger, *Wave–particle duality of C60 molecules*, Nature **401**, pp. 680–682, 14 October 1999. Voir également l'observation de la tétraphénylporphyrine et du $C_{60}F_{48}$ par la même équipe et publiée dans L. Hackermüller & al., *Wave nature of biomolecules and fluorofullerenes*, Physical Review Letters **91**, p. 090408, 2003.

Aucun phénomène de la théorie quantique n'a été autant étudié expérimentalement que les interférences quantiques. La transition de l'interférence vers la non-interférence a également été explorée, comme par exemple dans P. Facchi, A. Mariano & S. Pascazio, *Mesoscopic interference*, Recent Developments in Physics **3**, pp. 1–29, 2002. Cité à la page 87.

43 G. Papini, *Shadows of a maximal acceleration*, arxiv.org/abs/gr-qc/0211011. Cité à la page 89.

44 J. Perrin, *Discours de réception de son prix Nobel*, que l'on peut trouver sur www.nobel.se, et H. Nagaoka, *Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity*, Philosophical Magazine S6, 7, pp. 445–455, March 1904. Cité à la page 89.

45 N. Bohr, *On the constitution of atoms and molecules: Introduction and Part I – binding of electrons by positive nuclei*, Philosophical Magazine **26**, pp. 1–25, 1913, *On the constitution of*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

atoms and molecules: Part II – systems containing only a single nucleus, ibid., pp. 476–502, et *On the constitution of atoms and molecules: Part III*, ibid., pp. 857–875. Cité à la page 89.

46 Robert H. Dicke & James P. Wittke, *Introduction to Quantum Theory*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1960. Voir également Stephen Gasiorowicz, *Quantum Physics*, John Wiley & Sons, 1974. Cité à la page 91.

47 P. Carruthers & M. M. Nieto, *Phase and angle variables in quantum mechanics*, Review of Modern Physics **40**, pp. 411–440, 1968. Cité à la page 92.

48 La relation d'indétermination pour le mouvement de rotation est très bien expliquée par W. H. Louisell, *Amplitude and phase uncertainty relations*, Physics Letters **7**, p. 60, 1963. Cité à la page 92.

49 S. Franke-Arnold, S. M. Barnett, E. Yao, J. Leach, J. Courtial & M. Padgett, *Uncertainty principle for angular position and angular momentum*, New Journal of Physics **6**, p. 103, 2004. Le journal est accessible gratuitement sur internet. Cité à la page 92.

50 W. Gerlach & O. Stern, *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*, Zeitschrift für Physik **8**, p. 110, 1921. Voir également l'explication pédagogique de M. Hannout, S. Hoyt, A. Kryowonos & A. Widom, *Quantum measurement and the Stern–Gerlach experiment*, American Journal of Physics **66**, pp. 377–379, 1995. Cité à la page 94.

51 J. P. Woerdman, G. Nienhuis, I. Kuščer, *Is it possible to rotate an atom?*, Optics Communications **93**, pp. 135–144, 1992. Nous parlons ici d'atomes tournant autour de leur centre d'inertie. Les atomes peuvent bien évidemment tourner autour d'autres corps, comme il est expliqué dans M. P. Silverman, *Circular birefringence of an atom in uniform rotation: the classical perspective*, American Journal of Physics **58**, pp. 310–317, 1990. Cité à la page 96.

52 J. Schmiedmayer, M. S. Chapman, C. R. Ekstrom, T. D. Hammond, S. Wehinger & D. E. Pritchard, *Index of refraction of various gases for sodium matter waves*, Physical Review Letters **74**, p. 1043-1046, 1995. Cité à la page 96.

53 Le résultat initial est dû à V. de Sabbata & C. Sivaram, *A minimal time and time-temperature uncertainty principle*, Foundations of Physics Letters **5**, pp. 183–189, 1992. Les détails expérimentaux se trouvent, par exemple, dans G. T. Gillies & S. W. Allison, *Experimental test of a time-temperature formulation of the uncertainty principle via nanoparticle fluorescence*, Foundations of Physics Letters **18**, pp. 65–74, 2005. Cité à la page 97.

54 Albert Einstein & Max Born, *Briefwechsel 1916 bis 1955*, Rowohlt, 1969, tel qu'il est cité à la page 34. Cité à la page 98.

55 E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem I*, Annalen der Physik **79**, pp. 361–376, 1926, et *Quantisierung als Eigenwertproblem II*, Annalen der Physik **79**, pp. 489–527, 1926. Cité à la page 103.

56 C. G. Gray, G. Karl & V. A. Novikov, *From Maupertius to Schrödinger. Quantization of classical variational principles*, American Journal of Physics **67**, pp. 959–961, 1999. Cité à la page 103.

57 Y. Aharonov & D. Bohm, *Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory*, Physical Review **115**, pp. 485–491, 1959. Cité à la page 110.

58 R. Colella, A. W. Overhauser & S. A. Werner, *Observation of gravitationally induced quantum interference*, Physical review Letters **34**, pp. 1472–1474, 1975. Cité à la page 112.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

59 Le résultat précurseur qui a lancé cette exploration était Hans-Werner Fink & al., *Atomic resolution in lens-less low-energy electron holography*, Physical Review Letters **67**, pp. 1543–1546, 1991. Cité à la page 113.

60 L. Cser, Gy. Török, G. Krexner, I. Sharkov & B. Faragó, *Holographic imaging of atoms using thermal neutrons*, Physical Review Letters **89**, p. 175504, 2002. Cité à la page 113.

61 G. E. Uhlenbeck & S. Goudsmit, *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, Naturwissenschaften **13**, pp. 953–954, 1925. Cité à la page 116.

62 L. Thomas, *The motion of the spinning electron*, Nature **117**, p. 514, 1926. Cité à la page 117.

63 K. von Meyenn & E. Schucking, *Wolfgang Pauli*, Physics Today pp. 43–48, February 2001. Cité à la page 117.

64 T. D. Newton & E. P. Wigner, *Localized states for elementary systems*, Review of Modern Physics **21**, pp. 400–406, 1949. et L. L. Foldy & S. A. Wouthuysen, *On the Dirac theory of spin 1/2 particles and its nonrelativistic limit*, Physical Review **78**, pp. 29–36, 1950. Tous les deux sont des articles classiques. Cité à la page 118.

65 J. P. Costella & B. H. J. McKellar, *The Foldy–Wouthuysen transformation*, American Journal of Physics **63**, pp. 1119–1121, 1995. Cité à la page 119.

66 Pour un compte rendu de la première mesure du facteur de Landé de l'électron, voir H. R. Crane, *How we happended to measure g-2: a tale of serendipity*, Physics in Perspective **2**, pp. 135–140, 2000. La partie la plus intéressante est celle qui montre comment les expérimentalistes ont dû surmonter la conviction qu'avaient presque tous les théoriciens que la mesure était impossible dans le principe. Cité à la page 120.

67 Les facteurs de Landé des noyaux composites sont brièvement expliqués sur en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_moment et les valeurs mesurées se trouvent sur www-nds.iaea.org. Voir également H. Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Cité aux pages 121 et 286.

68 L'image d'un atome d'hydrogène la plus approchante que l'on ait pu produire à ce jour se trouve dans A. Yazdani, *Watching an atom tunnel*, Nature **409**, pp. 471–472, 2001. Les expériences sur les condensats de Bose-Einstein sont également des candidats pour des images d'atomes d'hydrogène. La société Hitachi s'est ridiculisée en 1992 en affirmant dans un communiqué de presse que son tout nouveau microscope électronique pouvait produire des images d'atomes d'hydrogène. Cité à la page 122.

69 A. M. Wolsky, *Kinetic energy, size, and the uncertainty principle*, American Journal of Physics **42**, pp. 760–763, 1974. Cité à la page 123.

70 Pour un résumé fascinant, voir M. A. Cirone, G. Metikas & W. P. Schleich, *Unusual bound or localized states*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/0102065. Cité à la page 124.

71 Voir l'article de Martin Gardner, *Science fiction puzzle tales*, Clarkson Potter, **67**, pp. 104–105, 1981, ou son livre *Aha! Insight*, Scientific American & W.H. Freeman, 1978. Plusieurs versions sont fournies par A. Hajnal & P. Lovász, *An algorithm to prevent the propagation of certain diseases at minimum cost*, dans *Interfaces Between Computer Science and Operations Research*, édité par J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan & P. Van Emde Boas, Mathematisch Centrum, Amsterdam 1978, alors que l'euphémisme informatique est utilisé par A. Orlitzky & L. Shepp, *On curbing virus propagation*, Technical memorandum, Bell Labs 1989. Cité à la page 126.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

72 Une discussion complète du problème se trouve au chapitre 10 de Ilan Vardi, *Computational Recreations in Mathematica*, Addison Wesley, 1991. Cité à la page 127.

73 Concernant le paradoxe de Gibbs, voir votre manuel préféré de thermodynamique ou de mécanique statistique. Voir également W. H. Zurek, *Algorithmic randomness and physical entropy*, Physical Review A **40**, pp. 4731–4751, 1989. Zurek montre que la formule de Sackur-Tetrode peut se déduire à partir de considérations d'entropie algorithmique. Cité à la page 128.

74 S. N. Bose, *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese*, Zeitschrift für Physik **26**, pp. 178–181, 1924. La théorie a ensuite été étendue par A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **22**, pp. 261–267, 1924, A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 3–14, 1925, et A. Einstein, *Zur Quantentheorie des idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 18–25, 1925. Cité à la page 133.

75 C. K. Hong, Z. Y. Ou & L. Mandel, *Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference*, Physical Review Letters **59**, pp. 2044–2046, 1987. Voir également T. B. Pittman, D. V. Strekalov, A. Migdall, M. H. Rubin, A. V. Sergienko & Y. H. Shih, *Can two-photon interference be considered the interference of two photons?*, Physical Review Letters **77**, pp. 1917–1920, 1996. Cité à la page 134.

76 Un exemple d'une telle expérience réalisée avec des électrons plutôt que des photons est décrite dans E. Bocquillon, V. Freulon, J.-M. Berroir, P. Degiovanni, B. Plaçais, A. Cavanna, Y. Jin & G. Fève, *Coherence and indistinguishability of single electrons emitted by independent sources*, Science **339**, pp. 1054–1057, 2013. Voir également le commentaire C. Schönenberger, *Two indistinguishable electrons interfere in an electronic device*, Science **339**, pp. 1041–1042, 2013. Cité à la page 134.

77 M. Schellekens, R. Hoppeler, A. Perrin, J. Viana Gomes, D. Boiron, C. I. Westbrook & A. Aspect, *Hanbury Brown Twiss effect for ultracold quantum gases*, Science **310**, p. 648, 2005, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/cond-mat/0508466. J. Viana Gomes, A. Perrin, M. Schellekens, D. Boiron, C. I. Westbrook & M. Belsley, *Theory for a Hanbury Brown Twiss experiment with a ballistically expanding cloud of cold atoms*, Physical Review A **74**, p. 053607, 2006, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/0606147. T. Jeltes, J. M. McNamara, W. Hogervorst, W. Vassen, V. Krachmalnicoff, M. Schellekens, A. Perrin, H. Chang, D. Boiron, A. Aspect & C. I. Westbrook, *Comparison of the Hanbury Brown-Twiss effect for bosons and fermions*, Nature **445**, p. 402, 2007, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/cond-mat/0612278. Cité à la page 135.

78 L'expérience est décrite dans E. Ramberg & G. A. Snow, *Experimental limit on a small violation of the Pauli principle*, Physics Letters B **238**, pp. 438–441, 1990. D'autres tests expérimentaux ont été passés en revue dans O. W. Greenberg, *Particles with small violations of Fermi or Bose statistics*, Physical Review D **43**, pp. 4111–4120, 1991. Cité à la page 137.

79 La version initiale du théorème de l'impossibilité du clonage quantique et de D. Dieks, *Communication by EPR devices*, Physics Letters A **92**, pp. 271–272, 1982, et de W. K. Wootters & W. H. Zurek, *A single quantum cannot be cloned*, Nature **299**, pp. 802–803, 1982. Pour une discussion sur le *clonage des photons* et des systèmes comportant plusieurs particules, voir N. Gisin & S. Massar, *Optimal quantum cloning machines*, Physics Review Letters **79**, pp. 2153–2156, 1997. L'ensemble du sujet a été pré-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

senté en détails par V. Buzek & M. Hillery, *Quantum cloning*, Physics World **14**, pp. 25–29, November 2001. Cité à la page 138.

80 S. J. Wiesner, *Conjugate Coding*, **SIGACT News**, **15**, pp. 78–88, 1983. Cet article, très largement cité, a été l'un des points de départ de la théorie de l'information quantique. Cité à la page 138.

81 Les résultats expérimentaux et théoriques les plus récents sur le clonage physique sont décrits dans A. Lamas-Linares, C. Simon, J. C. Howell & D. Bouwmeester, *Experimental quantum cloning of single photons*, Science **296**, pp. 712–714, 2002, dans D. Collins & S. Popescu, *A classical analogue of entanglement*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/0107082, 2001, et dans A. Daffertshofer, A. R. Plastino & A. Plastino, *Classical no-cloning theorem*, Physical Review Letters **88**, p. 210601, 2002. Cité à la page 139.

82 E. Wigner, *On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group*, Annals of Mathematics **40**, pp. 149–204, 1939. Cet article célèbre résume les travaux qui lui ont par la suite apporté le prix Nobel de physique. Cité aux pages 141 et 155.

83 Pour une liste complète des isotopes, voir R. B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition, 1999 Update*, avec CDROM, John Wiley & Sons, 1999. Cité à la page 146.

84 Ceci est déduit à partir des mesures de $g-2$, comme expliqué lors de son discours de réception du prix Nobel par Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990. Concernant le même sujet, voir également son article Ref. 67 et dans Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Pas de citation.

85 G. Gabrielse, H. Dehmelt & W. Kells, *Observation of a relativistic, bistable hysteresis in the cyclotron motion of a single electron*, Physical Review Letters **54**, pp. 537–540, 1985. Pas de citation.

86 W. Pauli, *The connection between spin and statistics*, Physical Review **58**, pp. 716– 722, 1940. Cité à la page 150.

87 Le tour de la ceinture a été popularisé par Dirac, Feynman et bien d'autres. Un exemple est R. P. Feynman, *The reason for antiparticles*, dans *Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures*, Cambridge University Press, 1987. Le tour de la ceinture est également expliqué, par exemple, à la page 1148 de C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973. Il est appelé le *tour des ciseaux* à la page 43 de volume 1 de R. Penrose & W. Rindler, *Spinors and Spacetime*, 1984. Il est également cité et discuté par R. Gould, *Answer to question #7*, American Journal of Physics **63**, p. 109, 1995. Pourtant, certains physiciens n'aiment pas l'image du tour de la ceinture pour les particules de spin 1/2; pour un exemple, voir I. Duck & E. C. G. Sudarshan, *Toward an understanding of the spin-statistics theorem*, American Journal of Physics **66**, pp. 284–303, 1998. Cité à la page 150.

88 M. V. Berry & J. M. Robbins, *Indistinguishability for quantum particles: spin, statistics and the geometric phase*, Proceedings of the Royal Society in London A **453**, pp. 1771–1790, 1997. Voir également les commentaires sur ce résultat de J. Twamley, *Statistics given a spin*, Nature **389**, pp. 127–128, 11 September 1997. Leurs résultats les plus récents sont dans M. V. Berry & J. M. Robbins, *Quantum indistinguishability: alternative constructions of the transported basis*, Journal of Physics A (Letters) **33**, pp. L207–L214, 2000, et dans M. V. Berry & J. M. Robbins, in *Spin–Statistics*, eds. R. Hilborn & G. Tino, American Institute of Physics, 2000, pp. 3–15. Voir également la page internet de Michael Berry sur www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv. Cité à la page 151.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

89 R. W. Hartung, *Pauli principle in Euclidean geometry*, American Journal of Physics **47**, pp. 900–910, 1979. Cité à la page 153.

90 La question est traitée dans sa *Somme théologique*, question 52 de la première partie. Le texte complet, plusieurs milliers de pages, se trouve sur le site www.newadvent.org. Les angélologues d'aujourd'hui, qui sont peu nombreux à travers le monde, sont également d'accord avec Thomas d'Aquin. Cité à la page 154.

91 Le fait de pouvoir considérer le spin comme une rotation avait déjà été évoqué par F. J. Belinfante, *On the spin angular momentum of mesons*, Physica **6**, p. 887, 1939, et reprise à nouveau par Hans C. Ohanian, *What is spin?*, American Journal of Physics **54**, pp. 500–505, 1986. Voir également E. Duran & A. Erschow, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **12**, p. 466, 1937. Cité à la page 156.

92 Voir le livre de Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar in Ref. 4. Cité à la page 159.

93 Les généralisations des bosons et des fermions ont fait l'objet d'une revue de synthèse dans l'article (sérieux!) de O. W. Greenberg, D. M. Greenberger & T. V. Greenbergest, *(Para)bosons, (para)fermions, quons and other beasts in the menagerie of particle statistics*, at arxiv.org/abs/hep-th/9306225. Un résumé plus récent se trouve dans O. W. Greenberg, *Theories of violation of statistics*, pré-imprimé en version électronique sur arxiv.org/abs/hep-th/0007054. Cité à la page 161.

94 Gell-Mann avait écrit ceci pour la Conférence Nobel de 1976 (pas pour son discours de réception du prix Nobel; il est le seul lauréat qui ne l'a jamais publié). M. Gell-Mann, *What are the building blocks of matter?*, dans D. Huff & O. Prewitt, editors, *The Nature of the Physical Universe*, New York, Wiley, 1979, p. 29. Cité à la page 162.

95 Voir par exemple les réimpressions de ces articles dans la collection standard de John A. Wheeler & Wojciech H. Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983. Cité à la page 163.

96 H. D. Zeh, *On the interpretation of measurement in quantum theory*, Foundations of Physics **1**, pp. 69–76, 1970. Cité à la page 163.

97 Linda Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Une excellente introduction à la thermodynamique. Cité à la page 165.

98 E. Joos & H. D. Zeh, *The emergence of classical properties through interactions with the environment*, Zeitschrift für Physik B **59**, pp. 223–243, 1985. Voir également Erich Joos, *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*, Springer Verlag, 2003. Cité à la page 168.

99 M. Tegmark, *Apparent wave function collapse caused by scattering*, Foundation of Physics Letters **6**, pp. 571–590, 1993, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/gr-qc/9310032. Voir également son article démontrant que le cerveau n'est pas un ordinateur quantique, M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review E **61**, pp. 4194–4206, 2000, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cité à la page 168.

100 La valeur maximale du temps de décohérence est limitée par le temps de relaxation. Voir A. O. Caldeira & A. J. Leggett, *Influence of damping on quantum interference: an exactly soluble model*, Physical Review A **31**, 1985, pp. 1059–1066. Ceci est la référence principale en ce qui concerne les effets de la décohérence sur un oscillateur harmonique. L'approche générale pour relier la décohérence à l'influence de l'environnement est due à Niels Bohr, et a été reprise en détail par Hans Dieter Zeh. Cité à la page 169.

101 G. Lindblad, *On the generators of quantum dynamical subgroups*, Communications in Mathematical Physics **48**, pp. 119–130, 1976. Cité à la page 169.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

102 Wojciech H. Zurek, *Decoherence and the transition from quantum to classical*, Physics Today pp. 36–44, October 1991. Un article facile mais quelque peu confus. Sa réponse aux nombreuses lettres qui questionnaient l'article se trouve dans Physics Today, April 1993, pp. 13–15, et pp. 81–90, ou il expose ses idées de manière plus claire et donne un avant-goût des discussions animées sur le sujet. Cité aux pages 170 et 176.

103 John Bardeen, l'expliquait régulièrement dans les conférences de synthèse qu'il donnait à la fin de sa vie, comme celle que l'auteur entendit à Tokyo en 1990. Cité à la page 170.

104 Des temps d'effondrement ont été mesurés pour la première fois par l'équipe de Serge Haroche à Paris. Voir M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maitre, A. Maali, C. Wunderlich, J. M. Raimond & S. Haroche, *Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement*, Physical Review Letters 77, pp. 4887–4890, 1996. Voir également C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune, J.-M. Raimond & S. Haroche, *Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting*, Nature **448**, pp. 889–893, 2007. Cité aux pages 170 et 184.

105 Des expériences confirmant par la suite les prédictions numériques de la décohérence ont été publiées par C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A "Schrödinger cat" superposition state of an atom*, Science **272**, pp. 1131–1136, 1996, par W. P. Schleich, *Quantum physics: engineering decoherence*, Nature **403**, pp. 256–257, 2000, et par C. J. Myatt, B. E. King, Q. A. Turchette, C. A. Sackett, D. Kielpinski, W. M. Itano, C. Monroe & D. J. Wineland, *Decoherence of quantum superpositions through coupling to engineered reservoirs*, Nature **403**, pp. 269–273, 2000. Voir également le résumé de W. T. Strunz, G. Alber & F. Haake, *Dekohärenz in offenen Quantensystemen*, Physik Journal **1**, pp. 47–52, November 2002. Cité à la page 170.

106 L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger & M. Arndt, *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation*, Nature **427**, pp. 711–714, 2004. Cité à la page 170.

107 K. Baumann, *Quantenmechanik und Objektivierbarkeit*, Zeitschrift für Naturforschung **25a**, pp. 1954–1956, 1970. Cité à la page 171.

108 Voir par exemple D. Styer, Physics Today p. 11, September 2000. Cité à la page 174.

109 David Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, 1951, pp. 614–622. Cité à la page 174.

110 A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Physical Review **48**, pp. 696–702, 1935. Cité à la page 174.

111 A. Aspect, J. Dalibard & G. Roger, *Experimental tests of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, Physical Review Letters **49**, pp. 1804–1807, 1982, Cité à la page 175.

112 G. C. Hergerfeldt, *Causality problems for Fermi's two-atom system*, Physical Review Letters 72, pp. 596–599, 1994. Cité à la page 176.

113 Une mesure expérimentale de superpositions de courants de 10^{10} électrons s'écoulant vers la gauche et vers la droite a été faite par J. E. Mooij, T. P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. H. van der Wal & S. Lloyd, *Josephson persistent-current qubit*, Science **285**, pp. 1036–1039, 1999. En 2000 il a été détecté des superpositions de courants de 1 µA dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Pour plus de détails voir J. R. Friedman & al., *Quantum superposition of distinct macroscopic states*, Nature **406**, p. 43, 2000. Cité à la page 176.

114 Il existe de nombreux articles sur la superposition des magnétisations dans les directions «up» et «down». Des expériences récentes sur la question de l'effet tunnel quan-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tique dans les systèmes magnétiques sont décrites dans D. D. Awschalom, J. F. Smith, G. Grinstein, D. P. DiVicenzo & D. Loss, *Macroscopic quantum tunnelling in magnetic proteins*, Physical Review Letters **88**, pp. 3092–3095, 1992, et dans C. Paulsen & al., *Macroscopic quantum tunnelling effects of Bloch walls in small ferromagnetic particles*, Europhysics Letters **19**, pp. 643–648, 1992. Cité à la page 177.

115 Par exemple, des superpositions dans les jonctions Josephson ont été observées par R. F. Voss & R. A. Webb, *Macroscopic quantum tunnelling in 1 mm Nb Josephson junctions*, Physical Review Letters **47**, pp. 265–268, 1981, Cité à la page 177.

116 S. Haroche, *Entanglement, decoherence and the quantum-classical transition*, Physics Today **51**, pp. 36–42, July 1998. Une expérience plaçant un atome à deux endroits en même temps, à une distance d'environ 80 nm, a été publiée par C. Monroe, C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A 'Schroedinger Cat' Superposition of an Atom*, Science **272**, pp. 1131–1136, 1996. Cité à la page 177.

117 M. R. Andrews, C. G. Townsend, H. -J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn & W. Ketterle, *Observations of interference between two Bose condensates*, Science **275**, pp. 637–641, 31 January 1997. Voir également le site Web www.aip.org/physnews/special.htm. Cité à la page 177.

118 Une discussion claire se trouve dans S. Haroche & J. -M. Raimond, *Quantum computing: dream or nightmare?*, Physics Today **49**, pp. 51–52, 1996, de même que les commentaires dans Physics Today **49**, pp. 107–108, 1996. Cité à la page 178.

119 La référence la plus célèbre sur l'effondrement de la fonction d'onde est le chapitre IV du livre de Kurt Gottfried, *Quantum Mechanics*, Benjamin, New York, 1966. C'était la référence préférée de Victor Weisskopf, qu'il citait à toutes les occasions qu'il avait de parler du sujet. Cité à la page 179.

120 La prédiction que l'effet tunnel quantique pouvait être observable lorsque l'interaction dissipative avec le reste du monde était suffisamment petite, a été faite par Leggett. On peut en trouver une revue de synthèse dans A. J. Leggett, S. Chahravarty, A. T. Dorsey, M. P. A. Fisher, A. Garg & W. Zwerger, *Dynamics of dissipative 2-state systems*, Review of Modern Physics **59**, pp. 1–85, 1987. Cité à la page 181.

121 S. Kochen & E. P. Specker, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, Journal of Mathematics and Mechanics **17**, pp. 59–87, 1967. Cité à la page 185.

122 J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony & R. A. Holt, *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Physical Review Letters **23**, pp. 880–884, 1969. Le résultat original, et plus général, se trouve dans J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics **1**, p. 195, 1964. Cité à la page 186.

123 D. M. Greenberger, M. A. Horne & A. Zeilinger, *Going beyond Bell's theorem*, réimpression de l'article de 1989 sur arxiv.org/abs/0712.0912. La première observation était de D. Bouwmeester, J. -W. Pan, M. Daniell, H. Weinfurter & A. Zeilinger, *Observation of three-photon Greenberger-Horne–Zeilinger entanglement*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/9810035. Cité à la page 186.

124 Bryce de Witt & Neill Graham, eds., *The Many–Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973. Cette interprétation parle d'entités qui ne peuvent pas être observées, à savoir les mondes multiples, et suppose souvent que la fonction d'onde de l'univers existe. Les deux habitudes sont des croyances et en contradiction avec les faits. Cité à la page 189.

125 «D'autre part, je pense pouvoir affirmer sans crainte que personne ne comprend la mécanique quantique.» de Richard P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Cambridge, 1965, p. 129. Il a fait cette déclaration à de nombreuses reprises, par exemple dans l'introduction, par ailleurs excellente, de *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin Books, 1990. Cité à la page 189.

126 M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review D **61**, pp. 4194–4206, 2000, ou également arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cité à la page 190.

127 On pourra suivre les liens entre la théorie quantique et la théorie de l'information dans la revue International Journal of Quantum Information. Cité à la page 191.

128 J. A. Wheeler, pp. 242–307, dans *Batelle Recontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, C. DeWitt & J. A. Wheeler, éditeurs, W.A. Benjamin, 1968. Pour une explication pédagogique, voir John W. Norbury, *From Newton's laws to the Wheeler-DeWitt equation*, arxiv.org/abs/physics/980604 ou European Journal of Physics **19**, pp. 143–150, 1998. Cité à la page 192.

129 Le livre le plus fascinant sur le sujet est de Kurt Nassau, *The Physics and Chemistry of Color – the Fifteen Causes of Color*, 1983, ainsi que l'excellent site Web webexhibits.org/causesofcolour. Cité à la page 195.

130 Y. Ruiz-Morales & O. C. Mullins, *Measured and Simulated Electronic Absorption and Emission Spectra of Asphaltenes*, Energy & Fuels **23**, pp. 1169–1177, 2009. U. Bergmann, H. Groenzin, O. C. Mullins, P. Glatzel, J. Fetzer & S. P. Cramer, *Carbon K-edge X-ray Raman spectroscopy supports simple, yet powerful description of aromatic hydrocarbons and asphaltenes*, Chemical Physics Letters **369**, pp. 184–191, 2003. Cité à la page 194.

131 Deux revues de synthèses excellentes, avec de nombreuses photographies sont de E. Grotewohl, *The genetics and biochemistry of floral pigments*, Annual Reviews of Plant Biology **57**, pp. 761–780, 2006, et de Y. Tanaka, N. Sasaki & A. Ohmiya, *Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids*, The Plant Journal **54**, pp. 733–749, 2008. Cité à la page 204.

132 L. Pérez-Rodriguez & J. Viñuda, *Carotenoid-based bill and eye coloration as honest signals of condition: an experimental test in the red-legged partridge (Alectoris rufa)*, Naturwissenschaften **95**, pp. 821–830, 2008, Cité à la page 204.

133 R. Pello, D. Schaerer, J. Richard, J.-F. Le Borgne & J.-P. Kneib, *ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at z=10,0*, Astronomy and Astrophysics **416**, p. L35, 2004. Cité à la page 207.

134 Une introduction pédagogique est fournie par L. J. Curtis & D. G. Ellis, *Use of the Einstein–Brillouin–Keller action quantization*, American Journal of Physics **72**, pp. 1521–1523, 2004. Voir également l'introduction de A. Klein, *WKB approximation for bound states by Heisenberg matrix mechanics*, Journal of Mathematical Physics **19**, pp. 292–297, 1978. Cité aux pages 208 et 213.

135 J. Neukammer & al., *Spectroscopy of Rydberg atoms at n ~ 500*, Physical Review Letters **59**, pp. 2947–2950, 1987. Cité à la page 212.

136 Mark P. Silverman, *And Yet It Moves: Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press 1993. Un très beau livre par un expert sur le mouvement. Cité aux pages 213, 220 et 221.

137 Ceci est expliqué par J. D. Hey, *Mystery error in Gamow's Tompkins reappears*, Physics Today pp. 88–89, May 2001. Cité à la page 212.

138 Cette belle expérience a été publiée pour la première fois dans A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robicheaux, A. Gijsbertsen, J. H. Jungmann,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

C. Bordas & M. J. J. Vrakking, *Hydrogen atoms under magnification: direct observation of the nodal structure of Stark states*, Physical Review Letters **110**, p. 213001, 2013. Cité aux pages 210 et 211.

139 L. L. Foldy, *The electromagnetic properties of Dirac particles*, Physical Review **83**, pp. 688–693, 1951, L. L. Foldy, *The electron–neutron interaction*, Physical Review **83**, pp. 693–696, 1951, et L. L. Foldy, *Electron–neutron interaction*, Review of Modern Physics **30**, pp. 471–481, 1952. Cité à la page 215.

140 H. Euler & B. Kockel, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Naturwissenschaften **23**, pp. 246–247, 1935, H. Euler, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Annalen der Physik **26**, p. 398, 1936, et W. Heisenberg & H. Euler, *Folgerung aus der Diracschen Theorie des Electrons*, Zeitschrift für Physik **98**, pp. 714–722, 1936. Cité à la page 218.

141 Voir l'explication simple de L. J. F. Hermans, *Blue skies, blue seas*, Europhysics News **37**, p. 16, 2006, et l'explication détaillée de C. L. Braun & S. N. Smirnov, *Why is water blue?*, Journal of Chemical Education **70**, pp. 612–614, 1993. Cité à la page 220.

142 La découverte a été publiée dans T. Friedmann & C. R. Hagen, *Quantum Mechanical Derivation of the Wallis Formula for* π , Journal of Mathematical Physics **56**, p. 112101, 2015, pré-imprimé sur arxiv.org/1510.07813. Voir également I Chashchina & Z. K. Silagadze, *On the quantum mechanical derivation of the Wallis formula for* π, pré-imprimé sur arxiv.org/1704.06153. Cité à la page 220.

143 Pour le cas utilisant des atomes, voir P. L. Gould, G. A. Ruff & D. E. Pritchard, *Diffraction of atoms by light: the near resonant Kapitza–Dirac effect*, Physical Review Letters **56**, pp. 827–830, 1986. Un grand nombre des tentatives expérimentales initiales pour observer la diffraction des électrons par la lumière, en particulier celles réalisées dans les années 1980, étaient controversées; la plupart ne montraient que la déflexion des électrons, comme expliqué par H. Batelaan, Contemporary Physics **41**, p. 369, 2000. Plus tard, avec l'aide de son équipe, il réalisa l'expérience la plus récente et la plus spectaculaire, démontrant une diffraction réelle, y compris les effets d'interférences. Elle est décrite dans D. L. Freimund, K. Aflatooni & H. Batelaan, *Observation of the Kapitza–Dirac effect*, Nature **413**, pp. 142–143, 2001. Cité à la page 221.

144 Un laser n'utilisant qu'un seul atome a été construit en 1994 par K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari & M. S. Feld, *Microlaser: a laser with one atom in an optical resonator*, Physical Review Letters **73**, p. 3375, 1994. Cité à la page 221.

145 Une introduction est donnée dans P. Pinkse & G. Rempe, *Wie fängt man ein Atom mit einem Photon?*, Physikalische Blätter **56**, pp. 49–51, 2000. Cité à la page 221.

146 J.P. Briand & al., *Production of hollow atoms by the excitation of highly charged ions in interaction with a metallic surface*, Physical Review Letters **65**, pp. 159–162, 1990. Voir également G. Marowsky & C. Rhodes, *Hohle Atome und die Kompression von Licht in Plasmakanälen*, Physikalische Blätter **52**, pp. 991–994, Oktober 1996. Cité à la page 221.

147 G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio & B. Odom, *New determination of the fine structure constant from the electron g value and QED*, Physical Review Letters **97**, p. 030802, 2006. Cité à la page 222.

148 A. Sommerfeld, *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, Annalen der Physik **51**, pp. 1–94, 1916, et le reste de l'article sous le même titre aux pp. 125–167 du même volume. La constante de structure fine avait été introduite dans le premier article, mais Sommerfeld expliquait que l'article était une transcription des conférences qu'il avait donnée en 1915. Cité à la page 223.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

149 Wolfgang Pauli, *Exclusion principle and quantum mechanics*, discours de réception de son prix Nobel, le 13 Décembre 1946, dans *Nobel Lectures, Physics*, Volume 3, 1942–1962, Elsevier, 1964. Cité à la page 223.

150 Un récit informatif du monde de la psychokinésie et du paranormal est donné par le célèbre magicien professionnel James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo 1987, ainsi que dans plusieurs de ses autres livres. Voir également le site Web www.randi.org. Cité à la page 229.

151 *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par le même organisme. Pour vous montrer la lenteur d'une ancienne institution, le BIPM n'a lancé un site Web qu'en 1998. Il est désormais joignable sur www.bipm.fr. Voir également le site Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, qui inclue les biographies des personnes qui ont donné leurs noms aux différentes unités. Le site de son équivalent britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est bien meilleur. Il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités SI. Cité à la page 233.

152 La bible dans le domaine de la mesure du temps est le travail en deux volumes de J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte rendu populaire est celui de Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes utilisés dans le domaine. Pour les mesures précises des *longueurs*, les outils de choix sont des lasers spéciaux, tels que les lasers à verrouillage de mode (ou blocage de mode, ou en anglais «mode-locked» [N.d.T.]) et les peignes de fréquence. Il existe une abondante littérature sur ces sujets. La littérature sur les mesures précises des *courants électriques* est tout aussi importante. Une compétition est en cours pour tenter de trouver la meilleure façon de le faire: compter les charges ou mesurer les forces magnétiques. La question fait toujours débat. En ce qui concerne les mesures de *masses* et de masses atomiques, voir le volume II, à la page 71. Sur les mesures de *températures* de haute précision, voir le volume I, à la page 548. Cité à la page 234.

153 Les préfixes SI non officiels ont été proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et pourraient devenir d'usage courant à l'avenir. Voir New Scientist **144**, p. 81, 3 Décember 1994. D'autres propositions moins sérieuses existent également. Cité à la page 236.

154 Pour plus de détails sur les systèmes d'unités électromagnétiques, voir le texte standard de John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Cité à la page 238.

155 D.J. Bird & al., *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Physical Review Letters **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cité à la page 239.

156 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, *Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures*, Physical Review Letters **70**, pp. 2818–2821, 1993. Voir également son article dans Scientific American, January 1994. Cité à la page 240.

157 A. Zeilinger, *The Planck stroll*, American Journal of Physics **58**, p. 103, 1990. Pouvez-vous trouver un autre exemple similaire? Cité à la page 240.

Défi 205 f

158 Un aperçu de ce travail fascinant est donné par J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

gravity, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992. Cité à la page 240.

159 L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge atomique à fontaine de césium, avait une précision d'un sur 10^{15}. Il a été annoncé qu'une précision plus élevée devrait bientôt être possible, entre autres par M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, *An optical lattice clock*, Nature **435**, pp. 321–324, 2005. Cité à la page 240.

160 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité à la page 240.

161 Voir l'information concernant les mésons $D_s^{\pm}$ sur le site du «Particle Data Group» sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité à la page 240.

162 Concernant la longue durée de vie du tantale 180, voir D. Belic & al., *Photoactivation of* $^{180}Ta^{m}$ *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters **83**, pp. 5242–5245, 20 December 1999. Cité à la page 241.

163 Voir la revue de synthèse par L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, *The detection of gravitational waves*, Reports on Progress in Physics **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cité à la page 241.

164 Voir l'article clair et détaillé de G. E. Stedman, *Ring laser tests of fundamental physics and geophysics*, Reports on Progress in Physics **60**, pp. 615–688, 1997. Cité à la page 241.

165 Les différents concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, ISO 5725, intitulée *Exactitude (justesse et fidélité)* des résultats et méthodes de mesure. Une bonne introduction est celle de John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité à la page 242.

166 P. J. Mohr, B. N. Taylor & D. B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/1203.5425. Il s'agit de l'ensemble des constantes résultant d'un ajustement international et qui sont recommandées pour les utilisations internationales par le Comité de données pour la science et la technologie (CODATA), lui-même un organe du Conseil international des unions scientifiques, qui regroupe l'Union internationale de physique pure et appliquée (IUPAP), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAP) ainsi que d'autres organisations. Le site Web de l'IUPAP est www.iupac.org. Cité à la page 243.

167 On peut trouver quelques-unes des histoires dans le texte de N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, dont sont issus les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une belle introduction en est donnée par J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Cité à la page 243.

168 Pour plus de détails, voir la célèbre référence en astronomie de P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité à la page 249.

169 Voir la référence correspondante dans le premier volume. Cité à la page 251.

170 Une bonne référence est *Encyclopedia of Mathematics*, en 10 volumes, Kluwer Academic Publishers, 1988–1993. Elle explique la plupart des concepts utilisés en mathématiques. Passer une heure à y rechercher des mots-clés apparentés est un moyen efficace pour obtenir une introduction sur n'importe quelle branche des mathématiques, en particulier sur le vocabulaire et les principaux liens.

L'approche inverse, pour rendre les choses aussi compliquées que possible, est adoptée dans le charmant texte de Carl E. Linderholm, *Mathematics Made Difficult*, 1971. Cité à la page 252.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

171 Une excellente introduction sur les systèmes de nombres en mathématique, y compris les nombres hyperréels (ou non standards), les quaternions, les octonions, les nombres p-adiques et les nombres surréels, est celle du livre de Heinz-Dieter Ebbinghaus, Hans Hermes, Friedrich Hirzebruch, Max Koecher, Klaus Mainzer, Jürgen Neukirch, Alexander Prestel & Reinhold Remmert, *Zahlen*, 3rd edition, Springer Verlag, 1993. Il est également disponible en anglais sous le titre *Numbers*, Springer Verlag, 1990. Cité aux pages 254, 264 et 265.

172 Pour un livre expliquant comment utiliser les nombres hyperréels au Lycée, voir Helmut Wunderling, *Analysis als Infinitesimalrechnung*, Duden Paetec Schulbuchverlag, 2007. Cité à la page 265.

173 A. Waser, *Quaternions in Electrodynamics*, 2001. Il est possible de télécharger le texte depuis plusieurs sites Web. Cité aux pages 257 et 262.

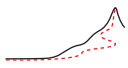
174 S. L. Altman, *Rotations, Quaternions and Double Groups*, Clarendon Press, 1986, et également S. L. Altman, *Hamilton, Rodriguez and the quaternion scandal*, Mathematical Magazine **62**, pp. 291–308, 1988. Voir également J. C. Hart, G. K. Francis & L. H. Kauffman, *Visualzing quaternion rotation*, ACM Transactions on Graphics **13**, pp. 256–276, 1994. Ce dernier peut être téléchargé depuis plusieurs sites sur internet. Cité à la page 259.

175 Voir l'excellent livre de Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, 2nd edition, 1994, qui fournit une introduction visuelle et claire des mathématiques des nœuds et de leurs applications principales en physique. Cité à la page 260.

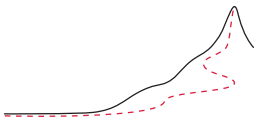
176 Les entiers de Gauss sont explorés par G. H. Hardy & E. M. Wright, *An Introduction to the Theory of Numbers*, 5th edition, Clarendon Press, Oxford, 1979, dans les sections 12.2 'The Rational Integers, the Gaussian Integers, and the Integers', pp. 178–180, et 12.6 'Properties of the Gaussian Integers' pp. 182–183. Pour des défis concernant les entiers de Gauss voir www.mathpuzzle.com/Gaussians.html. Cité à la page 265.

177 Concernant les nombres transfinis, voir le somptueux livre en édition de poche de Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, 1983. Cité à la page 265.

178 E. I. Butikov, *The rigid pendulum – an antique but evergreen physical model*, European Journal of Physics **20**, pp. 429–441, 1999, et D. Easton, *The quantum mechanical tipping pencil – a caution for physics teachers*, European Journal of Physics **28**, pp. 1097–1104, 2007. Cité à la page 273.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Crédits

Remerciements

Nombreux sont ceux qui, ayant su entretenir leur don de curiosité, ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Peter Rudolph et Saverio Pascazio ont été (présents ou non) une référence permanente pour ce projet. Fernand Mayné, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger et avant tout, mon épouse Britta ont tous apporté des conseils et des encouragements précieux.

De nombreuses personnes ont contribué au projet et à la collecte des documents et informations. Parmi les plus pertinentes, se trouvent l'aide de Mikael Johansson, de Bruno Barberi Gnecco et de Lothar Beyer, les innombrables améliorations de la part de Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farinati, les nombreuses améliorations de la part d'Eric Sheldon, les suggestions détaillées d'Andrew Young, l'aide et les conseils continus de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide étendue, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des documents importants ont été fournis par Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Damoon Saghian, Wladimir Egorov, Markus Zecherle, Miles Mutka, ainsi que par un certain nombre de personnes qui ont souhaité rester anonymes.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et de Achim Blumensath pour ce qui est des polices de charactères et de la mise en page, ainsi que grâce à

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'assistance précieuse et répétée de Donald Arseneau. Une aide a également été apportée par Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

La mise en page et le design de ce livre sont dus aux conseils professionnels d'Ulrich Dirr. La typographie a été considérablement améliorée avec l'aide de Johannes Küster et de sa police de caractères Minion Math. Le design de l'ouvrage et de son site Web doit également beaucoup aux suggestions et au soutien de mon épouse Britta.

Je remercie également les législateurs et les contribuables allemands qui, contrairement à la plupart des autres pays du monde, autorisent leurs résidents à utiliser les bibliothèques universitaires locales.

Entre 2007 et 2011, l'édition électronique et la distribution du texte de *Motion Mountain* ont été généreusement soutenues par la Fondation Klaus Tschira.

Crédits filmographiques

L'image et l'animation des orbitales de l'atome d'hydrogène de la page 90 ont été produites avec une copie sponsorisée du progiciel *Atom in a Box* de Dean Dauger disponible sur daugerresearch.com.

Les animations en couleur des fonctions d'onde de la page 101, de la page 106, de la page 107, de la page 111, de la page 123, de la page 216 et de la page 218 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Bernd Thaller; on peut les trouver sur son magnifique site Web vqm.uni-graz.at ainsi que sur les CDs qui accompagnent ses deux beaux livres: Bernd Thaller, *Visual Quantum Mechanics* Springer, 2000, et Bernd Thaller, *Advanced Visual Quantum Mechanics* Springer, 2004. Ces livres sont les meilleurs que l'on puisse lire pour acquérir une compréhension intuitive des fonctions d'onde et de leur évolution.

L'animation du tour de la ceinture de la page 148 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Greg Egan; on peut la trouver sur son site Web www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html.

La belle animation du tour de la ceinture de la page 148 et la merveilleuse animation (jusqu'à présent unique) de l'échange de fermions de la page 152 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Antonio Martos; on peut les trouver sur vimeo.com/62228139 et sur vimeo.com/62143283.

Crédits photographiques

La photographie de la face est du mont Langtang Lirung dans l'Himalaya népalais, que montre le plat avant de la couverture, est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Kevin Hite; on peut la trouver sur son blog thegettingthere.com. La photographie d'un ver luisant de la page 15 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par John Tyler; on peut la trouver sur son joli site Web www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm. La photographie d'un papillon aux ailes transparentes de la page 17 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Linda de Volder; on peut la trouver sur son site www.flickr.com/photos/lindadevolder. La photographie d'une fenêtre de train de la page 36 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Greta Mansour; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/wireful/. Le graphique du spectre de couleurs de la page 45 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Andrew Young; des explications sont données sur son site Web mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html. Les images de pellicules photographiques de la page 46 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Rich Evans. Les images de photomultipli-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

cateurs de la page 46 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Hamamatsu Photonics. Les images de l'expérience produisant des interférences de photons de faible intensité de la page 47 sont protégées par droits d'auteur de Delft University of Technology et aimablement fournies par Silvania Pereira; on peut les trouver sur le site Web www.optica.tn.tudelft.nl/education/photons.asp. La photographie de l'appareil à effet Compton de la page 50 a été prise par Helene Hoffmann et est aimablement fournie par Arne Gerdes de l'Université de Göttingen; on peut la trouver sur le site Web de l'enseignement de la physique lp.uni-goettingen.de. Le graphe de la page 55 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Rüdiger Paschotta; on peut le trouver sur sa merveilleuse encyclopédie du laser, disponible gratuitement sur www.rp-photonics.com. La photographie de l'interféromètre de Mach-Zehnder de la page 57 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Félix Dieu et Gaël Osowiecki; on peut la trouver sur leurs sites Web www.flickr.com/photos/felixdieu/sets/72157622768433934/ et www.flickr.com/photos/gaeloso/sets/72157623165826538/. La photographie de la page 58 est protégée par droits d'auteur de John Davis et est aimablement fournie par la NASA. L'image d'interférence produite par un miroir de télescope de la page 63 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Mel Bartels; on peut la trouver sur son site www.bbastrodesigns.com. L'image de la figure de granularité laser est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Epzcaw; on peut la trouver sur Wikimedia Commons. À la page 64, les figures d'interférences produites par deux fentes sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Dietrich Zawischa; on peut les trouver sur son site Web www.itp.uni-hannover.de/~zawischa dédié à la beauté et à la science. La figure d'interférence des faisceaux gaussiens est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Rüdiger Paschotta; on peut le trouver sur son encyclopédie du laser, disponible gratuitement sur www.rp-photonics.com. La photographie du ciel bleu de la page 77 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Giorgio di Iorio; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/gioischia/. Les images de l'expérience des fils métalliques qui se croisent à la page 85 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par José Costa-Krämer et par l'AAPT. La célèbre photographie de diffraction d'électrons de la page 86 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Claus Jönsson. La photographie presque aussi célèbre qui montre la formation de la diffraction des électrons à la page 86 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Tonomura Akira/Hitachi; on peut la trouver sur le site Web www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm. Le graphe de l'hydrogène de la page 96 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Peter Eyland. Les photographies de l'effet Aharonov-Bohm de la page 111 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Doru Cuturela. Les images de molécules d'ADN de la page 113 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Hans-Werner Fink; elles ont été utilisées avec la permission de Wiley VCH. Les images de l'expérience montrant le regroupement et l'anti-regroupement de ^{3}He et ^{4}He à la page 134 proviennent du site Web atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html; elles sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Denis Boiron et Jerome Chatin. La photographie de métal fondu de la page 195 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Graela; on peut la trouver sur flickr.com/photos/alaig. La photographie du cierge magique de la page 195 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Sarah Domingos; on peut la trouver sur son site Web flickr.com. La photographie du cœur de réacteur de la page 195 est aimablement fournie par la NASA; on peut la trouver sur le site Web grin.hq.nasa.gov. Les photographies de lampes à décharges de la page 195 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Pslawinski; on peut les trouver sur www.wikimedia.org. La photographie de l'aurore polaire de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Jan Curtis; on peut la trouver sur son site Web climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html. La photographie des flammes colorées de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Philip Evans; on peut la trouver sur son site

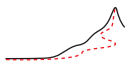
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Web community.webshots.com/user/hydrogen01. La photographie de l'iceberg de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Marc Shandro; on peut la trouver sur son site Web flickr.com/photos/mshandro. La photographie de malachite de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Stephan Wolfsried; on peut la trouver sur le site Web www.mindat.org. La photographie du masque de télévision de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Planemad; on peut la trouver sur le site Web www.wikimedia.org. Les photographies de minéraux de la page 197 et des pages suivantes sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Rob Lavinsky sur irocks.com; elles proviennent de sa vaste et somptueuse collection sur ce site ainsi que sur www.mindat.org/photo-49529.html. La photographie d'un narcisse de la page 197 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Thomas Lüthi; on peut la trouver sur son site Web www.tiptom.ch/album/blumen/. La photographie du doigt avec une goutte de sang de la page 197 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Ian Humes; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/ianhumes. La photographie de baies de la page 197 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Nathan Wall; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/ozboi-z. La photographie de la femme aux cheveux roux de la page 197 est de dusdin et est aimablement fournie par Wikimedia. La photographie rare d'un poisson pêcheur vivant de la page 198 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Steve Haddock; on peut la trouver sur son site Web www.lifesci.uscb.edu/~biolum/. La photographie de magnétite de la page 198 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Stephan Wolfsried; on peut la trouver sur le site Web www.mindat.org. La photographie du désert de la page 198 est protégée par droits d'auteur d'Evelien Willemsen et est aimablement fournie par Raf Verbeelen; on peut la trouver sur www.flickr.com/photos/verbeelen. La photographie du saxophone ténor de la page 199 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Selmer sur www.selmer.fr. La photographie de l'oxyde de zinc de la page 199 est de Walkerma et est aimablement fournie par Wikimedia. La photographie des points quantiques fluorescents de la page 199 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Andrey Rogach du Center de nanosciences de Munich. La photographie de zircone de la page 200 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Gregory Phillips; on peut la trouver sur le site Web commons.wikimedia.org. Le coucher de soleil sur Tokyo de la page 201 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Altus Plunkett on peut le trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/altus. La photographie de quartz bleu de la page 201 est protégée par droits d'auteur de 2008 et aimablement fournie par David K. Lynch; on peut la trouver sur son site Web www.thulescientific.com. La photographie du bonhomme de neige de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Andreas Kostner; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/bytesinmotion. La photographie de la grenouille venimeuse bleue en voie de disparition de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Lee Hancock; on peut la trouver sur le site Web www.treewalkers.org. La photographie de rubis doré de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par le Murano Glass Shop; on peut la trouver sur leur site Web murano-glass-shop.it. La photographie du gyrolaser avec génération de deuxième harmonique de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Jeff Sherman; on peut la trouver sur son site Web flickr.com/photos/fatllama. La photographie de l'ormeau de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Anne Elliot; on peut la trouver sur son site Web flickr.com/photos/annkelliot. La photographie des couleurs de polarisation de la page 202 est protégée par droits d'auteur de Nevit Dilmen et aimablement fournie par Wikimedia. La photographie du canard colvert de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Simon Griffith; on peut la trouver sur son site Web www.pbase.com/simon2005. La photographie de l'opale de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Opalsnopals; on peut la trouver sur le site Web www.

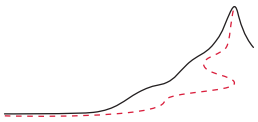
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

flickr.com. La photographie de la condensation par un avion de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Franz Kerschbaum; on peut la trouver sur le site Web epod.usra.edu. La photographie de CD de la page 203 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Alfons Reichert; on peut la trouver sur son site Web www.chemiephysikskripte.de/artikel/cd.htm. La figure de cristaux liquides de la page 203 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Ingo Dierking et Wiley/VCH; on peut la trouver dans son livre somptueux INGO DIERKING, *Textures of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, 2003. Voir également son site Web reynolds.ph.man.ac.uk/people/staff/dierking/gallery. Le spectre de couleurs mesuré de la page 205 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA et NSF. La photographie d'une décharge d'hydrogène de la page 207 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Jürgen Bauer; on peut la trouver sur le joli site Web www.smart-elements.com. Les illustrations des orbitales de l'hydrogène de la page 212 sont aimablement fournies par Wikimedia. Les images des structures atomiques nodales de la page 211 sont aimablement fournies par Aneta Stodolna et protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par l'American Physical Society; on peut les trouver sur journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.213001. Les graphes des états de lumière compressée de la page 272 sont aimablement fournis par G. Breitenbach et S. Schiller; ils sont protégés par droits d'auteur de Macmillan.

Les portraits historiques des physiciens qui apparaissent dans le texte sont du domaine public, excepté lorsque nous avons mentionné le contraire. La photographie sur le plat arrière de la couverture d'un lézard basilic courant sur l'eau est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par le groupe belge TERRA vzw; on peut la trouver sur leur site Web www.terravzw.org. Tous les dessins sont protégés par droits d'auteur de Christoph Schiller. Si vous soupçonnez que votre droit d'auteur n'a pas été correctement attribué ou obtenu, cette erreur n'est pas intentionnelle et vous êtes aimablement invité à contacter l'auteur dans ce cas.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Index des noms

A
AAPT 85, 297
Aedini, J. 281
Aflatooni, K. 291
Aharonov, Y. 283
Aichinger, Franz 295
Alber, G. 288
Allison, S.W. 283
Altman, S.L. 294
An, K. 291
Anderson, Carl 217
Anderson, M.H. 282
Andrews, M.R. 282, 289
Anton, A. 281
APS 211
Arndt, M. 282, 288
Aronson, Jeff K. 292
Aronson, Jeff K. 295
Arseneau, Donald 296
Aspect, A. 285, 288
Aspect, Alain 175
Aspelmeyer, M. 281
Ata Masafumi 295
Audoin, C. 292
Augel, Barbara 295
Augel, Edgar 295
Awschalom, D.D. 289

B
Babinet, Jaques
  sa vie 234
Bader, Richard F.W. 279
Baez, John 295
Bagnoli, Franco 295
Balibar, Françoise 279, 287
Balmer, Johann 206
Barberi Gnecco, Bruno 295
Bardeen, John 288
Barnett, S.M. 283
Bartel, Elmar 295
Bartels, Mel 63, 297
Batelaan, H. 291
Bauer, Jürgen 207, 299
Baumann, K. 288
Bautista, Ferdinand 295
Baylor, D.A. 280
Beaty, William 295
Beeksma, Herman 295
Belfort, François 295
Belic, D. 293
Belinfante, F.J. 287
Bell, J. 185
Bell, John 289
Bell, John
  sa vie 185
Belsley, M. 285
Bergmann, U. 290
Bergquist, J. 293
Bernard Shaw, George 81
Bernu, J. 288
Berroir, J.-M. 285
Berry, M.V. 286
Berry, Michael 286
Bessel 205
Beutelspacher, Albrecht 191
Beyer, Lothar 295
Biggar, Mark 295
Bird, D.J. 292
Björk, G. 281
Blair, D.G. 293
Blumensath, Achim 295
Boas, P. Van Emde 284
Bocquillon, E. 285
Bohm, D. 283
Bohm, David 288
Bohr, N. 278, 281, 282
Bohr, Niels 19, 41, 73, 88, 89, 162, 163, 188, 207, 287
  sa vie 19
Boiron, D. 285
Boiron, Denis 134, 297
Bombelli, Luca 295
Boone, Roggie 295
Bordas, C. 291
Borgne, J.-F. Le 290
Born, Max 279, 283
Born, Max 28, 98, 101
  sa vie 24
Bose, S.N. 285
Bouwmeester, D. 286, 289
Bradley, C.C. 282
Brahmagupta 253
Brandes, John 295
Braun, C.L. 291
Brebner, Douglas 295
Breitenbach, G. 280
Breitenbach, G. 272, 299
Brendel, J. 281
Brezger, B. 288
Briand, J.P. 291
Briand, J.P. 221
Brillouin, Léon 208
Broglie, L. de 282
Bronshtein, Matvei 8
Brown, R. Hanbury 280
Bruce, Tom 295
Brumberg, E.M. 280
Brumberg, E.M. 44

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

B

BRUNE

Brune, M. 288
Bub, J. 279
Buchmann, Alfons 295
Budney, Ryan 295
Bunsen, Robert 205
Busch, Paul 279
Butikov, E.I. 294
Buzek, V. 286
Böhncke, Klaus 296

C
Caldeira, A.O. 287
Candela, D. 282
Carlip, Steve 295
Carr, Jim 295
Carruthers, P. 283
Cato, Marcus Porcius 194
Cavanna, A. 285
Cayley, Arthur 263, 264
Center de nanosciences de Munich 298
Chahravarty, S. 289
Chang, H. 285
Chang, I. 281
Chapman, M.S. 283
Chashchina, O.I 291
Chatin, Jerome 134, 297
Childs, J.J. 291
Chu, Steven 221
Cicero, Marcus Tullius 81
Cirone, M.A. 284
Clauser, J.F. 289
Clifton, R. 279
Cohen, S. 290
Cohen-Tannoudji, C. 279
Cohen-Tannoudji, Claude 221
Colazingari, Elena 295
Colella, R. 283
Collins, D. 286
Compton, A.H. 280
Compton, Arthur 50
Conti, Andrea 295
Corovic, Dejan 295
Correia, A. 282
Costa-Krämer, J.L. 282
Costa-Krämer, José 84, 85, 297
Costella, J.P. 284
Courtial, J. 283
Cramer, S.P. 290
Crane, H.R. 284
Crespi, Roberto 295
Crommle, M.F. 274
Cser, L. 284
Curtis, Jan 196, 297
Curtis, L.J. 290
Cuturela, Doru 111, 297

D
d'Aquin, Thomas 154
Daffertshofer, A. 286
Dahlman, John 295
Dalibard, J. 288
Danecek, Petr 295
Daniell, M. 289
Darley, Vincent 296
Darre, Daniel 295
Dasari, R.R. 291
Dauger, Dean 90, 296
Davis, John 58, 297
Davis, K.B. 282
de Broglie, Louis 85
sa vie 37
de Volder, Linda 17
Deaver, B.S. 293
Degen, Carl Ferdinand 264
Degiovanni, P. 285
Dehmelt, H. 284, 286
Dehmelt, Hans 286
Delft University of Technology 47, 297
Deléglise, S. 288
DeWitt, C. 290
di Iorio, Giorgio 77
Dicke, Robert H. 283
Dieks, D. 285
Dieks, Dennis 138
Dierking, Ingo 299
Dierking, Ingo 203, 299
Dieter Zeh, Hans 287
Dieu, Félix 57, 297
Diez, Ulrich 296
DiFilippo, Frank 295
Dilmen, Nevit 202, 298
Diophante d'Alexandrie 255
Dirac 221
Dirac, P.A.M. 281
Dirac, Paul 66, 74, 214
sa vie 214
Dirr, Ulrich 296
Diu, B. 279
DiVicenzo, D.P. 289
Dobra, Ciprian 295
Domingos, Sarah 195, 297
Dorsey, A.T. 289
Dreyer, J. 288
Druten, N.J. van 282
Duck, I. 286
Duran, E. 287
Durfee, D.S. 282, 289
dusdin 198, 298
Dyson, Freeman 295

E
Easton, D. 294
Ebbinghaus, Heinz-Dieter 294
Egan, Greg 148, 296
Egorov, Wladimir 295
Einstein, A. 280, 285, 288
Einstein, Albert 283
Einstein, Albert 33, 60, 63, 118, 133, 208
Ekstrom, C.R. 283
Elitzur, Avshalom 77
Elliot, Anne 202, 298
Ellis, D.G. 290
Els, Danie 296
Elswijk, Herman B. 295
Emelin, Sergei 295
Engels, F. 279
Engels, Friedrich 43, 83
Englert, Berthold-Georg 279
Epzcaw 63, 297
Erdős, Paul
sa vie 252
Erich Haas, Arthur 23, 212
Erschow, A. 287
Euler, H. 291
Euler, Hans 218
Euler, Leonhard 258
Evans, Philip 196, 297
Evans, Rich 46, 296
Everitt, C.W. 293
Eyland, Peter 96, 297

F
Facchi, P. 282

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

F

FAIRBANKS

Fairbanks, J.D. 293
Faragó, B. 284
Farinati, Claudio 295
Feld, M.S. 291
Fermani, Antonio 295
Fermi, Enrico
  sa vie 133
Fetzer, J. 290
Feynman, R. P. 286
Feynman, Richard 189
Feynman, Richard P. 281, 289
Feynman,
  Richard («Dick») Phillips
  sa vie 67
Fink, Hans-Werner 284
Fink, Hans-Werner 113, 297
Finkenzeller, Klaus 295
Firestone, R.B. 286
Fischbach, E. 280
Fischer, Ulrike 296
Fisher, M.P.A. 289
Foldy, L.L. 284, 291
Foldy, L.L. 118
Foley, E.L. 282
Fondation Klaus Tschira 296
Fonseca, E.J.S. 281
Francis, G.K. 294
Franke-Arnold, S. 283
Fraunhofer, Joseph
  sa vie 205
Freimund, D.L. 291
Freulon, V. 285
Friedman, J.R. 288
Friedmann, T. 291
Fumagalli, Giuseppe 278
Furrie, Pat 295
Fève, G. 285

G

Gabrielse, G. 286, 291
Galilei, Galileo 22, 26
Garcia, N. 282
García-Mochales, P. 282
Gardner, Martin 284
Garg, A. 289
Gasiorowicz, Stephen 283
Gasparoni, S. 281
Gauß, Carl-Friedrich 265
Gelbaum, Bernard R. 268
Gell-Mann, M. 287
Gell-Mann, Murray 162, 163, 189
Georgi, Renate 295
Gerdes, Arne 297
Gerlach, W. 283
Gerlach, Walther
  sa vie 94
Gijsbertsen, A. 290
Gillies, G.T. 283
Gisin, N. 281, 285
Glanz, J. 280
Glassey, Olivier 295
Glatzel, P. 290
Glauber, R.J. 281
Glauber, Roy 70
Gleyzes, S. 288
González, Antonio 295
Gottfried, Kurt 289
Goudsmit, S. 284
Goudsmit, Samuel 116
Gould, P.L. 291
Gould, R. 286
Graela 195, 297
Graham, Neill 289
Grahn, Alexander 296
Graves, John 264
Gray, C.G. 283
Greenberg, O.W. 285, 287
Greenberg, Oscar 161
Greenberger, D.M. 287, 289
Greenbergest, T.V. 287
Gregorio, Enrico 296
Greiner, Jochen 295
Griffith, Simon 202, 298
Grinstein, G. 289
Grit, C.O. 274
Groenzin, H. 290
Grotewohl, E. 290
Guerlin, C. 288
Gácsi, Zoltán 295

H

Haake, F. 288
Haber, John 295
Hackermüller, L. 282
Hackermüller, L. 288
Haddock, Steve 198, 298
Hagen, C. R. 291
Hagley, E. 288
Hajnal, A. 284
Hakonen, P.J. 292
Haley, Stephen 295
Halvorson, H. 279
Hamamatsu Photonics 46
Hamilton 258
Hammond, T.D. 283
Hanbury Brown, Robert 58
Hancock, Lee 201, 298
Hanneke, D. 291
Hannout, M. 283
Hardcastle, Martin 295
Hardy, G.H. 294
Haroche, S. 288, 289
Haroche, Serge 170, 288
Hart, J.C. 294
Hartung, R.W. 287
Hausherr, Tilman 295
Hayes, Allan 295
Heaviside 262
Hegerfeldt, Gerhard 176
Heisenberg, W. 291
Heisenberg, Werner 27, 88, 218
  sa vie 26, 28
Helmond, Tom 295
Henderson, Paula 295
Hergerfeldt, G.C. 288
Hermann, Armin 279
Hermans, L.J.F. 291
Hermes, Hans 294
Herneck, Friedrich 281
Hertz 262
Hertz, Heinrich 60, 214
Hertzlinger, Joseph 296
Hess, Victor 103
Heumann, John 295
Hewitt, Susan 279
Hey, J.D. 290
Higashi, R. 293
Hilbert, David 253
Hilborn, R. 286
Hilgevoord, Jan 279
Hillery, M. 286
Hillman, Chris 295
Hirzebruch, Friedrich 294
Hitachi 86, 297
Hite, Kevin 296

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

H

HITLER

Hitler, Adolf 18
Hoffman, Richard 295
Hoffmann, Helene 50, 297
Hogervorst, W. 285
Holt, R.A. 289
Hong, C.K. 285
Hong, F.-L. 293
Hoppeler, R. 285
Hornberger, K. 288
Horne, M.A. 289
Howell, J.C. 286
Hoyt, S. 283
Huber, Daniel 295
Huff, D. 287
Hulet, R.G. 282
Humes, Ian 198, 298
Hurwitz, Adolf 264
Hänsch, Theodor 220

I
Icke, Vincent 279
Iorio, Giorgio di 297
Itano, W.M. 288
Ivanov, Igor 295

J
Jackson, John David 292
Jacobson, J. 281
Jalink, Kim 295
Jamil, M. 295
Jammer, Max 278
Janek, Jürgen 295
Janssen, Jules 206
Jeltes, T. 285
Jin, Y. 285
Johann Gottfried Galle 205
Johansson, Mikael 295
Johnson, Samuel 278
Jones, Quentin David 295
Jones, Tony 292
Jong, Marc de 295
Joos, E. 287
Joos, Erich 287
Jordan, Pascual 26, 28
Joseph Bohm, David
  sa vie 174
Joyce, James 173
Ju, L. 293
Jungmann, J.H. 290
Jönsson, C. 282
Jönsson, Claus 86, 87, 297

K
K. Lynch, David 298
Köppe, Thomas 295
Kan, A.H.G. Rinnooy 284
Kapitza 221
Karl, G. 283
Katori, H. 293
Kauffman, L.H. 294
Kauffman, Louis H. 294
Keller, C. 282
Keller, Joseph 208
Kells, W. 286
Kelu, Jonatan 295
Kerschbaum, Franz 202, 299
Ketterle, W. 282, 289
Kidd, R. 281
Kielpinski, D. 288
King, B. E. 289
King, B.E. 288
Kinoshita, T. 291
Kirchhoff, Gustav 205
Kiss, Joseph 295
Klauder, J.R. 281
Klein, A. 290
Klein, Oskar 218
Kloor, H. 280
Kneib, J.-P. 290
Kochen, S. 289
Kochen, S. 185
Kockel, B. 291
Koecher, Max 294
Kostner, Andreas 201, 298
Krachmalnicoff, V. 285
Krexner, G. 284
Krijn, Marcel 295
Kronig, Ralph 116
Kryowonos, A. 283
Królikowski, Jarosław 295
Kubala, Adrian 295
Kuhr, S. 288
Kurn, D.M. 282, 289
Kuzin, Pavel 295
Kuščer, I. 283
Küster, Johannes 296

L
Lagrange, Joseph 258
Laloë, F. 279
Lamas-Linares, A. 286
Langel, R.A. 280
Lavinsky, Rob 197, 200, 298
Leach, J. 283
Leggett, A.J. 287, 289
Lenstra, J.K. 284
Leonardo da Vinci 91
Levitov, L. 288
Lindblad, G. 287
Linde, Johan 296
Linderholm, Carl E. 293
Lintel, Harald van 295
Lloyd, S. 288
Lockyer, Joseph 206
Lombardi, Luciano 295
Loss, D. 289
Loudon, Rodney 280
Louisell, W.H. 283
Lovász, P. 284
Lui, A.T.Y. 280
Lundeen, J.S. 281
Lynch, David 201
Lépine, F. 290
Lévy-Leblond, Jean-Marc 279,
  287
Lüthi, Thomas 198, 298

M
Maali, A. 288
Macmillan 272, 299
Magyar, G. 281
Magyar, G. 74
Mahoney, Alan 295
Mainzer, Klaus 294
Maitre, X. 288
Malik, J. 279
Mandel, L. 281, 285
Mandel, L. 74
Mansour, Greta 36, 296
Mariano, A. 282
Mark, Martin van der 295
Marowsky, G. 291
Marqués, M. 282
Martikainen, J.E. 292
Martini, K.M. 282
Martos, Antonio 148, 152, 295,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

M

MASSAR

296
Massar, S. 285
Mattheck, Claus 279
Maxwell 262
Mayné, Fernand 295
Mayr, Peter 295
McKellar, B.H.J. 284
McNamara, J.M. 285
McQuarry, George 295
Meekhof, D. M. 289
Meekhof, D.M. 288
Mensky, M.B. 278
Merrit, John 295
Metikas, G. 284
Mewes, M.-O. 282
Meyenn, K. von 284
Meyer, J.C. 274
Michaelson, P.F. 293
Miesner, H.-J. 289
Migdall, A. 285
Milonni, P.W. 280
Misner, C.W. 286
Mitchell, M.W. 281
Mlynek, J. 280
Mohr, P.J. 293
Monken, C.H. 281
Monroe, C. 288, 289
Mooij, J.E. 288
Moortel, Dirk Van de 295
Moser, Lukas Fabian 295
Mullins, O.C. 290
Murdock, Ron 295
Murillo, Nadia 295
Mutka, Miles 295
Muynck, Wim de 295
Myatt, C.J. 288

N

Nagaoka Hantaro 89
Nagaoka, H. 282
Nairz, O. 282
Namouni, Fathi 295
NASA 297
Nassau, Kurt 290
Nath Bose, Satyenra
sa vie 133
Neukammer, J. 290
Neukirch, Jürgen 294
Neumaier, Heinrich 295
Neumann, János
sa vie 185
Newell, D.B. 293
Newton 79
Newton, T.D. 284
Newton, T.D. 118
Nienhuis, G. 283
Niepraschk, Rolf 296
Nieto, M.M. 283
Nieuwpoort, Frans van 295
Nio, M. 291
Norbury, John W. 290
Novikov, V.A. 283

O

Oberdiek, Heiko 296
Oberquell, Brian 295
Odom, B. 291
Offner, Carl 295
Ohanian, Hans C. 287
Ohmiya, A. 290
Olmsted, John M.H. 268
Oostrum, Piet van 296
Opalsnopals 202, 298
Orlando, T.P. 288
Orlitzky, A. 284
Osowiecki, Gaël 57, 297
Ou, Z.Y. 285
Overhauser, A.W. 283

P

Padgett, M. 283
Page, Don 295
Pahaut, Serge 95, 295
Pan, J.-W. 281, 289
Papini, G. 282
Parks, David 295
Pascal, Blaise
sa vie 51
Pascazio, S. 282
Pascazio, Saverio 295
Paschotta, Rüdiger 55, 64, 297
Pasi, Enrico 295
Paul, H. 281
Pauli, W. 286
Pauli, Wolfgang 292
Pauli, Wolfgang 28, 67, 150, 222
sa vie 117
Paulsen, C. 289
Payne, Cecilia
sa vie 206
Peeters, Bert 295
Pello, R. 290
Penrose, R. 286
Peredo, M. 280
Pereira, Silvania 297
Peres, Asher 279
Perini, Romano 295
Perrin, A. 285
Perrin, J. 282
Perrin, Jean 89
Philips, William 221
Phillips, Gregory 200, 298
Photonics, Hamamatsu 297
Pinkse, P. 291
Pittman, T.B. 285
Planck, Erwin 279
Planck, Max 278
Planck, Max 22, 52, 61, 118
sa vie 18
Planemad 197, 298
Plastino, A. 286
Plastino, A.R. 286
Plaçais, B. 285
Plunkett, Altus 201, 298
Podolsky, B. 288
Poincaré, Henri 280, 281
Poincaré, Henri 61
Popescu, S. 286
Prentis, J.J. 280
Prestel, Alexander 294
Prewitt, O. 287
Pritchard, Carol 295
Pritchard, D.E. 283, 291
Pritchard, David 96
Proença, Nuno 295
Pslawinski 196, 297
Purves, William 295
Pádua, de 61
Pádua, S. de 281
Pérez-Rodriguez, L. 290

R

Rahtz, Sebastian 296
Raimond, J.-M. 288, 289
Raimond, J.M. 288
Ramberg, E. 285

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

R

RAMBERG

Ramberg, E. 137
Randi, James 292
Rankl, Wolfgang 295
Redondi, Pietro 295
Reichert, Alfons 203, 299
Reichl, Linda 287
Remmert, Reinhold 294
Rempe, G. 291
Renselle, Doug 295
Reppisch, Michael 295
Rhodes, C. 291
Richard, J. 290
Rieke, F. 280
Rindler, W. 286
Rivas, Martin 295
Robbins, J.M. 286
Robertson, Will 296
Robicheaux, F. 290
Rogach, Andrey 200, 298
Roger, G. 288
Roos, Hans 279
Rosen, N. 288
Rosenfeld 73
Rosenfeld, L. 281
Rouzée, A. 290
Rowan Hamilton, William
  sa vie 257
Ruben, Gary 295
Rubin, M.H. 285
Rucker, Rudy 294
Rudolph, Peter 295
Ruff, G.A. 291
Ruiz-Morales, Y. 290
Rydberg, Johannes 207

S

S.R. Madhu Rao 295
Sabbata, V. de 283
Sackett, C.A. 282, 288
Sackur, Otto 128
Sagan, Hans 268
Saghian, Damoon 295
Salam, Abdus 279
Sasaki, N. 290
Sayrin, C. 288
Schaerer, D. 290
Schellekens, M. 285
Schiller, Britta 295, 296
Schiller, Christoph 299
Schiller, Friedrich
  sa vie 44
Schiller, Isabella 295
Schiller, Peter 295
Schiller, S. 280
Schiller, S. 299
Schiller, Stephan 295
Schleich, W.P. 284, 288
Schmiedmayer, J. 283
Schrödinger, E. 283
Schrödinger, Erwin 39, 208
  sa vie 103
Schubert, Max 279
Schucking, E. 284
Schwenk, Jörg 191
Schwinger, Julian 279
Schwinger, Julian 115, 116
Schönenberger, C. 285
Scott, Jonathan 295
Seidelmann, P. Kenneth 293
Selmer 199, 298
Serena, P.A. 282
Sergienko, A.V. 285
Shandro, Marc 196, 298
Sharkov, I. 284
Sharp, Nigel 205, 299
Sheldon, Eric 295
Shepp, L. 284
Sherman, Jeff 201, 298
Shih, Y.H. 285
Shimony, A. 289
Siart, Uwe 296
Sierra, Bert 295
Silagadze, Z.K. 291
Silverman, M.P. 283
Silverman, Mark 220
Silverman, Mark P. 290
Simon, C. 286
Simon, Julia 295
Singleton, Douglas 295
Sivaram, C. 283
Slabber, André 295
Smirnov, S.N. 291
Smith, J.F. 289
Snow, G.A. 285
Snow, G.A. 137
Solomatin, Vitaliy 295
Sommerfeld, A. 291
Sommerfeld, Arnold 212–214, 222
Specker, E.P. 289
Specker, E.P. 185
Stedman, G.E. 293
Steinberg, A.M. 281
Stern, O. 283
Stern, Otto
  sa vie 94
Stodolna, A.S. 290
Stodolna, Aneta 210, 211, 299
Story, Don 296
Strekalov, D.V. 285
Strunz, W.T. 288
Styer, D. 288
Subitzky, Edward 279
Sudarshan, E. C. G. 286
Sudarshan, E.C.G. 281
Surdin, Vladimir 295

T

Tacite 226
Takamoto, M. 293
Tanaka, Y. 290
Tarko, Vlad 295
Taylor, B.N. 293
Taylor, J.H. 292
Taylor, John R. 293
Tegelaar, Paul 295
Tegmark, M. 287, 290
Tetrode, Hugo 128
Thaler, Jon 295
Thaller, Bernd 296
Thaller, Bernd 101, 106, 107, 111, 123, 216, 218, 296
Thies, Ingo 295
Thomas, L. 284
Thomas, Llewellyn 117
Thorne, K.S. 286
Tian, L. 288
Tibère 226
Tino, G. 286
Tittel, Wolfgang 281
Tollett, J.J. 282
Tonomura Akira 86, 297
Townsend, C.G. 289
Townsend, Paul 295
Trevorrow, Andrew 296
Tschira, Klaus 296
Tuominen, M.T. 282

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tuppen, Lawrence 295
Turchette, Q.A. 288
Twamley, J. 286
Twiss, R.Q. 280
Twiss, Richard 58
Tyler, John 18, 296
Török, Gy. 284

U
Uguzzoni, Arnaldo 295
Uhlenbeck, G.E. 284
Uhlenbeck, George 116
Upright, Craig 296
Ursin, R. 281

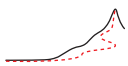
V
Vaidman, Lev 77
Vanier, J. 292
Vannoni, Paul 295
Vardi, Ilan 285
Vassen, W. 285
Vavilov, S.I. 280
Vavilov, S.I. 44
Verbeelen, Raf 298
Viana Gomes, J. 285
Vico, Giambattista
  sa vie 186
Viñuda, J. 290
Volder, Linda de 296
Volin, Leo 295
Voltaire 226
von Neumann, John 163
  sa vie 185
Vos-Andreae, J. 282
Voss, Herbert 296
Voss, R.F. 289
Vrakking, M.J.J. 291
Vuorinen, R.T. 292

W
Wal, C.H. van der 288
Walkerma 199, 298
Wall, Nathan 198, 298
Walther, P. 281
Warkentin, John 296
Waser, A. 294
Webb, R.A. 289
Weber, Gerhard 279
Wehinger, S. 283
Weinberg, Steven 281
Weinberg, Steven 121, 163
Weinfurter, H. 289
Weiss, Martha 295
Weisskopf, Victor 289
Werner, S.A. 283
Westbrook, C.I. 285
Weyl, Hermann 147
Wheeler, J.A. 286, 290
Wheeler, John 270
Wheeler, John A. 287
Widom, A. 283
Wierda, Gerben 296
Wierzbicka, Anna 295
Wiesner, S.J. 286
Wiesner, Stephen 138
Wigner, E. 286
Wigner, E.P. 284
Wigner, E.P. 118
Wigner, Eugene
  sa vie 141
Wigner, Eugene P. 279
Wijk, Mike van 295
Wikimedia 212, 298, 299
Wiley VCH 113, 297
Wiley/VCH 299
Willard Gibbs, Josiah
  sa vie 128
Willemsen, Evelien 199, 298
Wineland, D. J. 289
Wineland, D.J. 288
Wise, N.W. 293
Witt, Bryce de 289
Wittke, James P. 283
Woerdman, J.P. 283
Wolfenstätter, Klaus-Dieter
  191
Wolfsried, Stephan 197, 199, 298
Wollaston, William 205
Wolsky, A.M. 284
Wootters, W.K. 285
Wootters, W.L. 138
Wouthuysen, S.A. 284
Wouthuysen, S.A. 118
Wright, E.M. 294
Wright, Joseph 296
Wunderlich, C. 288
Wunderling, Helmut 294

Y
Yamamoto, Y. 281
Yao, E. 283
Yazdani, A. 284
Young, Andrew 45, 295, 296

Z
Zaccone, Rick 296
Zalm, Peer 295
Zawischa, Dietrich 64, 297
Zbinden, H. 281
Zecherle, Markus 295
Zedler, Michael 295
Zeh, H.D. 287
Zeh, Heinz-Dieter 163
Zeilinger, A. 281, 282, 288, 289, 292
Zeilinger, Anton 122
Zetti, A. 274
Zhao, C. 293
Zouw, G. van der 282
Zurek, W.H. 285
Zurek, W.H. 138
Zurek, Wojciech H. 287, 288
Zuse, Konrad 185
Zwerger, W. 289

Épicure 44, 48



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Index des sujets

A
acausalité 173
accélération
  de Planck 238
  maximale 89
accélération
  limite quantique 89
acier chaud 195
action
  de Planck 237
  voir action, quantum d'
  EBK 213
  quantique, principe de 116
  quantum d' 225
action $\hbar$, quantum d' 19
action quantique 115
addition 253
adjoint
  opérateur 136
Aharonov-Bohm
  effet 110
Aharonov-Casher
  effet 112
algèbre alternative 263
algèbre de Cayley 263
algèbre à division 261
alternative
  algèbre 263
amortissement 168
amplitude
  d'un nombre complexe 256
amplitude de probabilité 187
ampoule 195
ampère
  définition 233
analyse non standard 265
ange 226
anges
  et la théorie quantique 153–155
  et principe d'exclusion 154
angle
  de mélange électrofaible 244
angélologie 287
animation
  dans le coin inférieur gauche 173
anneau 253
anneau unitaire 253
annihilation
  opérateur d' 136
annulation
  des termes non-diagonaux 164
année lumière 247, 249
année tropique 247
anthocyanes 204
anti-commutateur 137
anti-regroupement 60
antimatière *voir* antiparticule
antimatière 217
antiparticules 228
anyon 161
aphélie 248
aplatissement de la Terre aux pôles 248
apogée 248
appareil
  définition 181
  irréversible 188
appareil
  classique 188
  de mesure 188
apprendre
  meilleur méthode pour 9
  sans marqueurs 9
  sans écran 9
APS 299
arbre
  bruit lorsqu'il tombe 188
arc
  lampe à 195
arc-en-ciel
  et composition du Soleil 205
  et les éléments dans le Soleil 205
argent quantique 275
argon
  lampe à 196
asphaltènes 194
assiette
  tour de l' 149
astrologie 229
atome
  et l'électronium 123
  creux 221
  forme des 210
  individuel, manipulation 221
  rouler 96
  taille d'un 23
  taille non nulle des 154
atome
  et sens 18
  individuel 177

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

A

ATOME

atome d'hydrogène 284
atome d'hélium 124
atomes
taille des 223
atomes
durée de vie des 230
atomes de Rydberg 212
attaché
objet 147–153
attendre
comme effet quantique 22
atto 236
aurore polaire 196
avocat 43
Avogadro
nombre d' 244
axe
de rotation 93
axiome
définition 253
azimutal
nombre quantique 212

B

Baker-Campbell-Hausdorff
formule de 269
bande d'énergie 145
baryon
densité du nombre de 250
bas
quark 144
base
unités de 233
base
d'un espace vectoriel 268
BCH
formule 269
beauté 146
becquerel 235
Bell
inégalité de 185, 186
belt trick 148
Benham
disque ou toupie 203
Bennett-Brassard
protocole 139
bioluminescence 198
biphoton 61
BIPM 233
bit
constante de conversion en entropie 247
bleu
couleur de l'eau 220
couleur de la mer 220
Bohm
expérience de pensée de 174
Bohr
magnéton de 117, 246
rayon de 211, 246
boites de haricots, danger des 41
Boltzmann
constante de 169
physique et constante de 8
Boltzmann
constante de 244
découverte de la constante de 18
bombe
amorcée par un seul photon 77
bord
n'est jamais net 122
Bose-Einstein
condensat de 284
Bose-Einstein
condensat de 83
boson 136
intermédiaire 120
boson de Higgs
masse du 245
boson de Higgs 121, 145
boson W 144
masse du 245
boson Z 144
masse du 245
bosons 70, 133
bottom
quark 145
bottomness 146
bougie
couleur d'une 195
bras 260
bras 149
bremsstrahlung 195
brome 196
Bronshtein
cube de 8
Bureau international des poids et mesures 233
bâtonnets de la rétine 280
bétalaïnes 204

C

cachée
variable 186
cachée
variable 184
candela
définition 234
caractéristique 254
cardinaux 265
caroténoïdes 204
Casimir
effet 230
casse-tête du gant 126
causalité 183
Cayley
algèbre de 263
nombres de 263
ceinture
tour de la 149, 296
cellule de l'espace des phases 67
centi 236
centre, quaternion 261
CERN 239
cerveau 109
CGPM 233, 234
changement
minimisation du *voir* moindre action
quantum de 19
quantum de, valeur précise du 244
changement
mesure par l'action 19
changement de point de vue 99
charge
du positon ou de l'électron, valeur de la 244
élémentaire *e*, physique et 8
charge faible 145

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

C

CHARGES

charges inorganique
transfert de 198
charme
quark 145
chat de Schrödinger 163, 172
chimique, liaison 90
chimère 139
chlore 196
chute libre 21
cierge magique
couleur d'un 195
circulation
quantum de 246
ciseaux
tour des 149, 286
CKM
matrice de transformation des quarks 244
classification
des concepts 252
cloche
et principe d'exclusion 153
clonage des photons 285
clone
physique 138–140
clone
biologique 139
clévéite 206
CODATA 293
cohérence 177
des voitures 87
des électrons 113–114
longueur de 57, 67
temps de 57, 59
transversale 113
volume de 67
cohérence 172
définition 114
cohérence, longueur de 59
cohérente
superposition 164
Commission internationale
des poids et mesures 233
commutatif 253
commutation des opérateurs
hamiltonien et quantité de mouvement 123
commutation, manque de 39
complet
propriété d'un ensemble 254
complexe conjugué 255
complémentarité, principe de 88
composite
critère pour être 120–122
composite 120
comprendre
théorie quantique 43
compressée, lumière 54, 62
Compton
longueur d'onde de 121
Compton
longueur d'onde de 229, 246
concepts
classification des 252
condensat 273
condensat de Bose-Einstein 83, 284
conductance
quantum de 246
conductivité
quantification de la 84–85
configurations
espace des 152
Conférence générale des poids et mesures 233, 234
conscience 188
conscience
pas importante en théorie quantique 188
constant
de Boltzmann 169
constante
cosmologique 250
de Boltzmann 244
de couplage électromagnétique
voir constante de structure fine
de la loi du déplacement de Wien 247
de Planck
voir action, quantum d'
de Stefan-Boltzmann 230, 247
des gaz parfaits 246
constante
de couplage de Fermi 244
de couplage fort 244
de Faraday 246
de gravitation géocentrique 247
de gravitation héliocentrique 248
de Hubble 250
de Josephson 246
de Planck 49
de Planck, valeur de la 244
de Rydberg 230, 246
de structure fine 211, 213, 214, 222, 223, 230, 237, 244, 245
de Von Klitzing 246
gravitationnelle 244
constante de Rydberg 207
constante gravitationnelle *G*
physique et 8
constantes
astronomiques, tableau des 247
cosmologiques, tableau des 250
physiques dérivées, tableau des 246
physiques fondamentales, tableau des 244
Convention du Mètre 233
coordonnées rationnelles 251
copie parfaite 138
Coriolis
accélération de, dans les atomes 220
corps 253
rigide 41
corps gauche 253
corps lumineux 51
cosmologique
constante 250
couches atomiques 154
couleur
centres de 200
origine des 194
premier résumé sur 224
tableau sur l'origine des 195

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

C

COULEUR

couleur 49, 223
  charge de 145
couleurs
  tableau sur l'origine des 203
Coulomb
  jauge de 174
coulomb 235
couplage minimal 215
couplage électromagnétique
  constante de
  voir constante de structure fine
courant
  de Planck 237
courbe
  remplissant l'espace 268
CPT 117
croissance 34
cryptanalyse 191
cryptographie 191
cryptographie quantique 139
cryptologie 191
cryptologie quantique 191
crème fouettée 24
création
  opérateur de 136
création 219
création de paire 229
cube
  de Bronshtein 8
  de la physique 8
cyclotron
  fréquence 246
cônes de la rétine 280

D

danse des bougies balinaises 149
danse du vin des Philippines 149
de Broglie
  longueur d'onde
  thermique de 170
deca 236
deci 236
degré
  Celsius 235
degré
  unité d'angle 235
demi-vie 145
densité
  matrice 164
dessous
  quark 145
dessus
  quark 145
deux carrés
  théorème des 255
deuxième propriété des mesures quantiques 179
diable 226
dieu 226
dieux 187
dieux 222
diffraction
  de la matière par la lumière 221
  des états quantiques 105
diffraction
  comme origine des couleurs 202
  de Bragg 78
  définition de la 67
  et diffusion 78
  figure de 179
  par un réseau 69
diffusion 200
  définition 77
  types de 77
diffusion
  Brillouin 78
  Compton 78
  de Mie 78
  de Rayleigh 78
  de Von Laue 78
  géométrique 78
  photon-photon 230
  Raman 78
  inverse 78
  Thomson 78
  Tyndall 78
diffusion Smekal-Raman 78
dimension 268
dimensions
  spatiales, trois 152
dispersion 200
  de la fonction d'onde 106
dispersion 106
dispositifs supraconducteurs à interférence quantique 112
distance ferroviaire française 266
distinct
  photons 66
distinction
  macroscopique 163
distribution de probabilité 90
division 254
dons à ce livre 10
Doppler
  effet 207
double
  nombre 265
down
  quark 144
dualité onde-particule 51
duplicateur 39
  absence de 139
  définition 138
  fonction 138
durée de vie 145
dyatique
  produit 164
décalage de Lamb 230
décohérence 165–189
  de la lumière 177
  temps de 166, 169
décohérence 40
  processus de 165, 178
décomposition 32
décroissance radioactive 229
déesse 226
défis
  classification 9
démon 226
désinformation 43
désintrication 172
désintrication 165
  processus de 178
désintégration 228
détachable 172
détecteur 181
détecteur de mouvement
  de nos sens 18
déterminisme 189

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

E

EAU

E
eau
couleur bleu 220
eau
couleur bleu 196
EBK
quantification 208
effet Aharonov-Bohm 110
effet Aharonov-Casher 112
effet Doppler 207
effet Hall quantique
fractionnel 161
effet Josephson 112
effet tunnel 107–109
pour la lumière 109
effet tunnel 31, 107, 108, 228
effondrement
de la fonction d'onde 173, 184, 187
temps d' 184
effondrement
de la fonction d'onde 105
définition 179
immédiat du spin 175
Einstein-Podolsky-Rosen
paradoxe de 174
Ekert
protocole 139
enchevêtrement 39
enchevêtrement 172
endoctrinement 43
enregistrement 178
enseignement
meilleur méthode pour 10
ensemble 128
entiers 253
entiers
de Gauss 265
entropie
constante de conversion en bit 247
de Planck 237
environnement 166
EPR 139, 174
erreur
systématique 241
totale 241
erreur
de mesure 241
relative 242
erreurs aléatoires 241
escrime 158
espace
vectoriel 265
espace
de Hilbert 99, 102, 267, 268
de phases 54
des configurations 152
métrique 266
espace vectoriel
muni d'un produit scalaire 267
espace vectoriel 265
euclidien 267
hermitien 267
linéaires 266
unitaire 267
espaces linéaires 265, 266
esprit 188, 226
euclidien
espace vectoriel 267
eumélanine 198
europium 197
Exa 236
exactitude
limites de l' 243
exactitude 241
excitations dans les gaz 195
exclusion
principe d' 153–155
expansion
décimale périodique 265
explication 188
expérience
de Hanbury Brown et Twiss 134
de pensée de Bohm 174
expérience
de Stern et Gerlach 94, 98

F
facteur de Landé 117, 120
de l'électron 246
du muon 246
du proton 247
faible
charge 145
isospin 145
fantôme 226
fantômes 161
farad 235
Faraday
constante de 246
femto 236
fenêtre dans le train 36
fenêtre dans le train 36
fer à cheval 41
Fermi
constante de couplage de 244
fermion
pas de cohérence 160
fermion 137
fermions 133
feu
couleur du 195
feu d'artifice
couleur d'un 195
ficelles
tour des 149
film
dans le coin inférieur gauche 173
film
et action 19
fine
structure 214
fleur 204
flou
fondamental 83
fluctuation
du point zéro 83
fluctuations 165
flux magnétique
quantum de 246
flèche tournante 100
fonction d'onde
dispersion de la 106
effondrement de la 105, 184
est un nuage 122
phase d'une 109–113
symétrie de la 132
visualisation 100
étalement de la 106
fonction d'onde 100, 102, 103, 187
effondrement de la 173

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

F

FONCTION

en tant que nuage tournant 109
phase de la 109
visualisation 103
fonction d'état 187
fonction de partition 274
fonction propre 182
fonctionnelle densité 164
fond diffus micro-onde
température du 250
fondamental
état 210
force de l'électromagnétisme 222
forme 23, 89
formulation de l'intégrale de chemin 115
formule
de Balmer 207
formule
BCH 269
de Baker-Campbell-Hausdorff 269
de Sackur-Tetrode 128
fractales
n'apparaissent pas dans la nature 95
fractales 40
frapper
et le caractère fermionique de la matière 154
sur les tables 84
Fraunhofer
raies de 205
freinage
rayonnement de 195
frottement 168
fréquence cyclotron 246

G

G
parité 145
Galilée et les quanta 26
gant
casse-tête du 126
problème du 126
gant 139
Gauss
distribution de 241
entiers de 265
loi de 241
nombre premier de 265
gaussiennes
système d'unités 238
gaz 127
simple 128
gaz parfaits 246
gaz parfaits
constante universelle des 246
Gedankenexperiment *voir* expérience de pensée
Gibbs
paradoxe de 128
Giga 236
glace
couleur 196
Glauber, état de 53
gluon 144
masse du 245
graviton 38, 146
gravité
à la surface du Soleil 249
gray 235
groupe 253
de Lorentz inhomogène 142
de Poincaré 141
spécial orthogonal 260
groupe de Lorentz
inhomogène 141
Gulliver
les voyages de 23
gyromagnétique
rapport 120
géants
pas dans la nature 23
gélatine 225
génie 61
générateurs
des quaternions 257
Göttingen 26

H

H_2O 24
Hamilton
function de 118
hamiltonien 103
Hanbury Brown et Twiss
expérience de 70
Hanbury Brown et Twiss
effet 62
haricots
danger des boites de 41
hasard
et quantum d'action 35–36
expérimental 180
haut
quark 144
Heaviside-Lorentz
système d'unités 238
hecto 236
Heisenberg
représentation d' 162, 175
henry 235
hermitien
espace vectoriel 267
hertz 235
heure 235
Higgs
boson de 121
Higgs
masse du boson de 245
Hilbert
espace de 99, 102, 267, 268
Hiroshima 42
Hitachi 284
hologramme
faisceaux d'électrons 113
horizon
mouvement et aspects quantiques 226
horloges 29
Hubble
constante de 250
huit carrés
théorème des 264
hydrogène
atome d' 284
couleurs de l' 206–210
dans l'eau 23
dans le Soleil 206
images d' 274
niveaux d'énergie 104
orbitales 90
taille atomique 123

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

H

HYDROGNE

taille de l'atome 89
hydrogène
atomes, existence des 122
couleurs de l'atome d' 240
hypercomplexe
nombre 263
hyperréel
nombre 265
hélicité 50, 143
hélium
atome d' 124
dans le Soleil 206
découverte de l' 206
hélium 120, 170, 206
regroupement 134
hémoglobine 204

I

images 228
impossibilité du clonage quantique
théorème de l' 138, 139, 285
impulsion-énergie
quadrivecteur 142
impénétrabilité
de la matière 32, 158
impénétrabilité
de la matière 160, 228
impôts
recouvrement des 233
incandescence 19
incandescence 195
incertitude *voir* indétermination
incertitude
relation d' 88
relative 242
totale 242
incohérente
superposition 165
indice de Maslov 209
indistinguables 128
indétermination
relation d' 88
infographie
en trois dimensions 260
informatique
et théorie quantique 39
interférence 163
de photons 74
des électrons 113
et les bombes 77
et les photons 63–67
quantique 105
interférence
comme origine des couleurs 202
d'ondes 74
franges 63
radio 74
interféromètre 56
photo d'un 57
interféromètre 241
en anneau 241
à onde de matière 87
intermédiaire
boson 120
interprétation
de la mécanique quantique 163, 189
interpénétration
des atomes et des liaisons 90
interpénétration
de la matière 154
lumière contre matière 158
intrication 39
degré d' 177
intrication 172, 175
intégrale de chemin
formulation de l' 115
invariant
de Lorentz 142
voir aussi action, quantum d'
voir aussi invariance de Lorentz
voir aussi unités de Planck
voir aussi vitesse de la lumière
inversion de charge 143
inversion de mouvement 143
inégalité de Bell 185, 186
iode 196
ionisation
énergie d' 210
irréductible
représentation 141, 142
irréversible 168
isospin faible 145
isotopes 138
IUPAC 293
IUPAP 293

J

Jarlskog
invariant de 244
jauge de Coulomb 174
Josephson
constante de 246
effet 112
joule 235
jour
sidéral moyen 247
jour
unité de temps 235
Journal of Irreproducible Results 279
jumeaux
échange de 136
Jupiter
propriétés de 248

K

katal 235
kelvin
définition 234
kilo 236
kilogramme
définition 233
kilotonne 42
Korteweg-de Vries
équation de 123

L

La Montagne Mouvement
aider le projet 10
but de la série de livres 7
soutenir le projet 10
lacs
couleur bleu 220
lagrangien
opérateur 115
lagrangien 115
Lamb
décalage de 230
lampe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L

LAND

à néon 196
de poche, couleur 195
de ville à sodium 196
à argon 196
à mercure 196
Landé
facteur de 117, 120
laplacien
opérateur 104
largeur à mi-hauteur 241
laser
refroidissement des atomes par 276
épée 158
laser
cavité 52
cohérence 59
à gaz 196
lave
couleur de la 195
lego 18
liaison chimique 90
libération
vitesse de 210
Lilliput 229
limites
de l'exactitude 243
de la précision 243
linéarité de la mécanique quantique 163
litre 235
localité 183
loi de Gauss 241
loi de Moore 41
loi normale 241
longueur
de cohérence 67
de Planck 237
échelle de 228
échelle, pas en physique classique 16
longueur
d'onde de Compton 121
d'onde thermique de de Broglie 170
de cohérence 57, 59
gravitationnelle
de la Terre 247
Lorentz
groupe de 141
groupe de, inhomogène 142
symétrie de
voir invariance de Lorentz
Loschmidt
nombre de 246
lumen 235
luminosité du Soleil 248
lumière
voir aussi vitesse de la lumière
compressée 52–56
effet tunnel pour la 109
est constituée de bosons 158
incohérente 177
macroscopique 177
non classique 52–56
non-classique 61
réseau de 221
lumière 51
cohérente 53, 55
compressée 54, 62
non-classique 54
thermique 53
Lune
densité 248
Lune
propriétés de la 248
lux 235
Lyman-alpha
raie de 207

M

macroscopique
système 172
magie 231
magma
couleur du 195
magnétite 199
magnéton 120
de Bohr 117, 246
nucléaire 246
maillons ouverts 161
main
pour visualiser les quaternions 259
marqueur
mauvais pour apprendre 9
Maslov
indice de 209
masse
atomique, unité de 145, 246
de l'électron 244
de Planck 237
du boson de Higgs 245
du boson W 245
du boson Z 245
du gluo 245
du muon 244
du neutrino muonique 244
du neutrino tauique 244
du neutrino électronique 244
du photon 245
du quark bas (down) 245
du quark charme (charm) 245
du quark dessous (bottom) 245
du quark dessus (top) 245
du quark haut (up) 245
du quark étrange (strange) 245
du tau 244
masse
de la Terre 247
du Soleil 248
rapport de
muon-électron 246
neutron-proton 247
neutron-électron 247
proton-électron 246
masse volumique
de Planck 237
matière
densité de la 159
interpénétration de la 154
mouvement de la 81–125
taille de la 159
matière
longueur d'onde de la 229
matrice densité 164
matrices de spin de Pauli 261
matériau
propriétés 222
propriétés des, premier

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

M

MATRIAU

résumé sur 224
recherche 222
science des 222
matériau
optiquement dense 69
Mega 236
mer
couleur bleu 220
la plus bleau 220
mercure
lampe à 196
mercure
état liquide du 221
mesure
appareil 188
comparaison 236
comparaison avec l'état 98–100
définition 233, 236
erreur de 241
irréversibilité 236
pas de précision infinie 82
processus 237
précision *voir* précision
signification 236
mesure
perturbe 188
mesures 99, 178
mi-hauteur
largeur à 241
micro 236
microscope 26
microscope
à force de résonance magnétique 117
microscopique
système 171
mile 236
milli 236
minimisation
du changement
voir moindre action
Minion Math, police de caractères 296
minute 235
minute d'arc
définition 249
unité d'angle 235
miroir 67, 109
mixte
état 164
moindre action
principe de 114
mole 138
définition 234
molécules
taille des 230
vibration et rotation des 196
moment cinétique
relation d'indétermination 92
moment cinétique
de l'électron 156
intrinsèque 93
minimum mesuré 229
mondes multiples 189
mort 170
mort 32
mouvement
de la matière 81–125
de quantons liés 120
des quantons 124
est fondamental 234
et les unités de mesure 234
quanton et 225
mouvement
en remontant le temps 29
luminaire 51
moyenne 169
mozzarella 25
multiples
mondes 189
multiplication 253
muon
facteur de Landé 246
muon 144
masse du 244
moment magnétique 246
moment magnétique anormal du 230
muon-électron
rapport de masse 246
muonium
séparation hyperfine du 230
myoglobine 204
mythe du spin 155
mètre
définition 233
mécanique quantique
appliquée aux évenements individuels 189
interprétation de la 163
voir aussi physique quantique
voir aussi théorie quantique
mécanique quantique
origine du terme 24
mégatonne 42
mélanine 204
mémoire 109, 181
mémoire vive 108
mémorisation 178
métalliques
bandes 199
métaux de transition
composés de 196
impuretés de 197
métrique
espace 266

N

nano 236
nature
et informatique 39
nature 187
naturelle
unité 245
neutrino
matrice PMNS de transformation des 244
neutrino 167
masse du 244
muonique 144
électronique 144
neutrino tauique 144
neutron 120
longueur d'onde de Compton 247
masse du 247
moment magnétique du 247
neutron-proton
rapport de masse 247
neutron-électron

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

N

New

rapport de masse 247
New Age 189
newton 235
niveaux d'énergie 209
nombre
hypercomplexe 263, 265
théorie des 265
nombre
de Cayley 263
de Loschmidt 246
double 265
hyperréel 265
premier de Gauss 265
q 265
quantique 143, 145
rationnel 254
réel 254
transfini 265
nombre complexe 254–257
représentation 256
représenté par une flèche 255
nombre complexe 254
nombre surréel 265
nombres 252–265
non locale 173
non standard
analyse 265
non-classique
lumière 61
non-unitarité 188
normale
distribution 241
loi 241
normalité de π 251
norme 255, 258, 266
noyau
de sodium 93
noyau 93
nuage
en théorie quantique 90
quantique 103
nuage
en théorie quantique 95
quantique 90
nymphe 226
néon
lampe à 196

O

objet
attaché 147–153
faits de particules 225
objet 171
observables
ne commutent pas 39
observables 99
observateur
sont faits de rayonnement 190
observateur
humain 188
observation 180, 181
observation 178
octaves 263
octonions 263
ohm 235
onde
des photons aux 70–71
interférence 74
onde
et nombre complexe 254
évanescente 109
opérateur 99
adjoint 136
d'annihilation 136
de création 136
lagrangien 115
laplacien 104
or
couleur jaune 221
orbite
à l'intérieur des atomes 206
ordinateur
l'Univers n'est pas un 191
ordinateur
quantique 139, 178
ordinaux 265
ordonné
totalement 254
organique
composé 197
origine
de la physique quantique 18
des couleurs, tableau de l' 195–203
oxygène
dans l'eau 23

P

paire
création de 229
papillon 16, 17
paradoxe
EPR 174
paradoxe
de Gibbs 128
parité 145
G 145
spatiale 143
parsec 247
particule
simple 128
virtuelle, définition 219
vitesse d'une 105
voir aussi particule élémentaire
voir aussi matière
voir aussi quanton
voir aussi particule virtuelle
élémentaire
voir aussi particule
particule 135
dénombrable 132
virtuelle 72, 131
particule quantique
flèche et 227
interactions 228
nuage et 227
onde et 227
phase et 227
résumé du mouvement des 124
vue comme un renflement 135
particule quantique
indistinguabilité 228
particule réelle
définition 219
particule élémentaire 226
particules
limites du dénombrement des 219
partition

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

P

PASCAL

fonction de 274
pascal 235
passion
cacher 252
Paul
piège de 124
Pauli
matrices de spin de 261
pression de 154
principe d'exclusion 158, 159
principe d'exclusion de *voir* principe d'exclusion, 137, 150, 153
équation de 118
permanence 190
permanence 30
permanganate 199
permittivité
diélectrique du vide 246
permutation
de particules 126–140
symétrie de 131
perméabilité
magnétique du vide 246
personne
minuscule, pas dans la nature 23
Peta 236
phase
d'une fonction d'onde 109–113
espace de 54
phase 37
définition 256
et nombre complexe 254
quantique 100
thermodynamique 128
philosophes 51
phosphore 222
photochromisme 200
photon
clonage des 285
comme particule élémentaire 52
comme une flèche 64
des, aux ondes 70
détection des ondes radio 273
détection sans absorption 222
et interférence 67
et œil nu 44
interférence 74
intriqués 61
localisation 56–60
plus rapide que la lumière 71–72
position d'un 56–60
position of 56
virtuel 72
photon 38, 44, 51, 143
densité du nombre de 250
individuel, détecté par l'œil 48
masse du 245
spin du 50
photon-photon
diffusion 230
photons
des, aux ondes 71
et interférence 63
photons 47, 70, 227
physique
carte de la 8
cube de 8
physique classique
limites de la 16
manque de précision 229–230
ne définit pas d'échelles 16
ne permet pas les mesures 17
pas d'échelles de longueur et de temps 16
physique newtonienne
voir physique galiléenne
physique quantique
voir aussi théorie quantique
découverte fondamentale 18
et la magie 231
et la vie 232
la vie et la 16
pas d'infiniment petit 225
pour les poètes 16
probabilités en 227
précision de la 229–230
précision finie et 229
résumé de la 225–232
phénomènes surnaturels 229
phéomélanine 198
pico 236
pierre 33, 38, 69, 85, 153, 225
piège de Paul 124
plaisir
est un processus quantique 18
plaisir 18
Planck
accélération de 238
action de 237
voir action, quantum d'
constante de
voir action, quantum d'
courant électrique de 237
entropie de 237
longueur de 237
masse de 237
masse volumique de 237
promenade de 240
quantité de mouvement de 238
temps de 237
température de 237
unités naturelles de 237
valeur de la constante de 244
vitesse de 237
énergie de 238
Planck
constante (non réduite) 19
constante de 19
constante de, découverte de la 18
plancton 220
plantes
florales 204
PMNS
matrice de transformation des neutrinos 244
Poincaré
groupe de 141
point de vue
changement de 99
point zéro

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

P

POINTEUR

fluctuation du 83
pointeur 182
polarisation 200
de la lumière 50
polarisation 70
du vide 219
police 108
position 190
positon 217
charge spécifique 246
valeur de la charge du 244
positron
nom incorrecte du positon 217
potentiel sphérique 209
praséodyme 197
première propriété des mesures quantiques 179
pression
atmosphérique 248
de Pauli 154
photosphérique basse du Soleil 249
principe
d'exclusion 153–155
d'exclusion, et les anges 154
d'incertitude
voir relation d'indétermination
d'indétermination
voir relation d'indétermination quantique 18
principe
d'exclusion de Pauli 137, 150, 153
de complémentarité 41, 88
de l'action quantique 116
de moindre action 114
principe d'exclusion de Pauli 158, 159
principe d'indétermination
température et temps 96
principe quantique 19
prison 43
probabilité 179
amplitude de 187
en physique quantique 227
problème du gant 126
problème du préservatif 126
produit dyatique 164
produit intérieur 267
produit scalaire 267
espace vectoriel muni d'un 267
produit tensoriel 164
produit vectoriel 264
promenade de Planck 240
propriété
intrinsèque 226
proton
facteur de Landé 247
rayon du 120
proton 120
charge spécifique du 246
longueur d'onde de Compton 246
masse du 246
moment magnétique du 246
rapport gyromagnétique 247
proton-électron
rapport de masse 246
protonvolt 239
précision
de la physique quantique 229–230
limites de la 243
pas infinie lors d'une mesure 82
précision 241
préfixe
SI 236
unités SI, tableau 235
préfixes 235, 292
préservatif
problème du 126
pur
état 163
pénétrabilité
de la matière 32
périgée 248
périhélie 248
pôle Nord 93

Q

q
nombre 265
QED 216
quadrivecteur
impulsion-énergie 142
quanta
et Galilée 26
quanta
de lumière 44, 51
quanti
piccolissimi 26
quantification
EBK 208
quantification 48
quantique
argent 275
cryptographie 139
cryptologie 191
interférence 105
nombre 143, 145
ordinateur 139, 178
origine du terme 24–26
électrodynamique 216
quantique
système 171
quantité de mouvement
de Planck 238
quanton
voir aussi particule
mouvement d'un 226–229
résumé du mouvement des 124
vitesse d'un 105
élémentaire 226
quanton 51, 84, 225
quantum
d'action 225
de conductance 246
de flux magnétique 246
quantum
d'action 18, 19
d'action, valeur précise du 244
de changement 19
de circulation 246
de lumière 38
quantum computing 289
quantum d'action $\hbar$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

physique et 8
quark
matrice CKM de transformation des 244
quark
bas (down) 144
charme (charm) 145
dessous (bottom) 145
dessus (top) 145
haut (up) 144
étrange (strange) 144
quark bas (down)
masse du 245
quark charme (charm)
masse du 245
quark dessous (bottom)
masse du 245
quark dessus (top)
masse du 245
quark haut (up)
masse du 245
quark étrange (strange)
masse du 245
quaternion 257
conjugué 258
homogène 258
imaginaire pur 258
partie scalaire d'un 258
partie vectorielle d'un 258
purement imaginaire 258
unitaire 259
unités de base 257
quaternions
en astronomie 260
quatre carrés
théorème des 258
qubit 178

R

radian 235
radio
interférence 74
radioactive
décroissance 229
radioactivité 128
raie
de Lyman-alpha 207
RAM 108
random access memory 108
rapport gyromagnétique 120
électron 230
rationnelles
coordonnées 251
rayon
de Bohr 211, 246
de Schwarzschild 239
polaire de la Terre 247
équatorial de la Terre 247
rayon du proton 120
rayonnement
observateurs sont faits de 190
rayonnement
de freinage 195
rayons X 50
reconnaissance 136
refroidissement
des atomes par laser 276
relation
d'incertitude
voir aussi relation d'indétermination
d'indétermination, pour un grand nombre de fermions 159
d'indétermination, étendue 159
relation
d'incertitude 28, 88
d'indétermination 88
d'indétermination, pour le moment cinétique 92
relations d'indétermination 27
relative
erreur 242
incertitude 242
relaxation 168
renflement
visualisant une particule quantique 135
repos
absence de 81–83
repos 21
n'existe pas 227
représentation 261, 263
représentation
d'Heisenberg 162
de Schrödinger 162
irréductible 142
représentation d'Heisenberg 175
représentation irréductible 141
revêtement double 260
robotique 260
rotation
axe de 93
des atomes 96
et spin 156
rotation 259
rubis doré 201
Rydberg
atomes de 212
constante de 230, 246
règle graduée 29
réaction 34
réelle
particule, définition 219
réflexion
totale, et amplification de lumière 221
réflexion 67
réfraction 69, 200
des ondes de matière 96
réfraction
et photons 75
réseau 69
de lumière 221
réservoir
thermodynamique 165
résonance magnétique
microscope à force de 117
résultats de mesures 99
rétine
bâtonnets de la 280
cônes de la 280

S

Sackur-Tetrode
formule de 128
samarium 197
sang
couleur du 198
sans dimension 245
saphir 199
Sargasses

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

mer des 220
scalaire 266
multiplication 265
Schrödinger
chat de 163, 172
représentation de 162
équation de 103–105
équation du mouvement de 103
Schwarzschild
rayon de 239
science-fiction 158
seconde
définition 233
seconde d'arc
définition 249
unité d'angle 235
semi-anneau 253
semi-conducteurs
bandes 199
sens 18
comme détecteur de mouvement 18
serment
et le quantum d'action 43
sexualité 34
SI
définition des unités 233
préfixes
tableau des 235
préfixes des unités 235
unités 243
unités dérivées 235
unités supplémentaires 235
SI
unités 233
siemens 235
sievert 235
simulateurs de vol 260
SO(3) 142
sodium
lampe de ville à 196
sodium 96
sol
pourquoi il ne tombe pas 154
Soleil
gravité à la surface du 249
luminosité du 248
masse du 248
pression photosphérique basse du 249
soliton 123
sources 74
soutien à ce livre 10
spectre 179
des objets chauds 230
spermatozoïde 25
spin 116–118
1/2 116
définition de l'amplitude 142
utilisation de la valeur du 142
spin 93, 116, 141, 142, 228
1/2, et les quaternions 260
mythe 155
spin et rotation 156
spin-statistique
théorème 158
spineur 152, 217, 260
spineurs 260
sponsor de ce livre 10
squark 295
Stefan-Boltzmann
constante de 230, 247
Stern et Gerlach
expérience de 94
strange
quark 144
structure fine
constante de 211, 213, 214, 222, 223, 230, 237, 244, 245
structure fine 214
structure ordonnée 254
stéradian 235
surréel
nombre 265
symétrie
de Lorentz
voir invariance de Lorentz
symétrie
d'un système physique 142
de permutation 131
Système
géodésique mondial 249
système
définition en physique quantique 175
lié 123
microscopique 27
système 162, 171
classique 28
d'unités gaussiennes 238
d'unités Heaviside-Lorentz 238
d'unités électromagnétiques 238
d'unités électrostatiques 238
macroscopique 27, 172
macroscopique, clonage de 139
microscopique 26, 27
microscopique, définition 26
mésoscopique 26
nanoscopique 26
Système international d'unités (SI) 233
systèmes intriqués 39
sédénions 265
séparabilité 172

T

T.N.T. 42
tableau
de l'origine des couleurs 195–203
des précisions de la physique quantique 229–230
tableau
périodique des éléments 154
tachyons 29
taille
de toutes choses 223
taille
des atomes 223
tau 144
masse du 244
temps
de Planck 237
échelle de 229
échelle, pas en physique classique 16

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

T

TEMPS

temps
d'effondrement 184
de cohérence 57, 59
de décohérence 166, 169
température
de Planck 237
tensoriel
produit 164
Tera 236
Terre
aplatissement aux pôles 248
longueur gravitationnelle de la 247
masse de la 247
rayon polaire de la 247
rayon équatorial de la 247
Terre
densité moyenne de la 248
gravité normale de la 248
âge de la 248
tesla 235
thermodynamique
troisième loi de la 81
thermostat 172
physique 165
théorie des nombres 265
théorie quantique
voir aussi physique quantique
et informatique 39
résumé et principaux résultats de la 225–232
théorie quantique 26
des champs 137
théorème
de l'impossibilité du clonage quantique 138, 139, 285
des deux carrés 255
des huit carrés[263
des quatre carrés 258
spin-statistique 158
TNT
contenu énergétique du 247
Tom Pouce 40
tonne 235
top
quark 145
topness 146
totalement ordonné 254
toucher
pourquoi peut-on 158
tour de l'assiette 149
tour de la ceinture 149, 157–160, 260
tour de la ceinture 260, 296
tour des ciseaux 149, 286
tour des ficelles 149
trace 165
trajectoires 37
transfini
nombre 265
nombre ordinal 265
troisième loi de la thermodynamique 81
troyens
électrons 124
tube de télévision 108
tunnel
effet 228
télékinésie 229
téléphone portable
mauvais pour apprendre 9
téléportation 229
télévision
tube de 108
téraoctet 108
tête nucléaire 42

U

udeko 236
Udekta 236
Union astronomique internationale 249
Union géodésique et géophysique internationale 249
unitaire
espace vectoriel 267
unitarité 183, 188
unité
astronomique 247
unité
astronomique 249
de masse atomique 145, 246
unité naturelle 245
unités
de Planck 237
de Planck, correction 238
de Planck, en tant que limite 238
naturelles
voir aussi unités de Planck
naturelles de Planck*voir*
unités de Planck, unités naturelles
régionales 236
unités
de base 233
de Planck corrigées 238
naturelles de Planck 237
naturelles véritables 238
unités non SI 236
unités SI
définition 233
préfixes des 235
unités SI 243
dérivées 235
supplémentaires 235
Univers
fonction d'onde de 192
n'est pas un ordinateur 191
pas de conditions initiales 193
up
quark 144

V

vacuoles 204
valeur absolue 255
valeur propre 99, 100
définition 179
et mesure 179
valeurs propres
de la vitesse 119
variable cachée 184–186
variance 241
Vavilov–Čerenkov
rayonnement 195
vecteur 258, 265
vecteur propre 99, 100, 179
définition 179
vectoriel
produit 264

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

vendeko 236
Vendekta 236
ver luisant 18
ver luisant 198
vide 220
  voir aussi espace
  mouvement et aspects quantiques 226
  permittivité diélectrique du 246
  perméabilité magnétique du 246
  polarisation du 219
vide 130, 220
  impédance caractéristique du 246
  état de 136
vidéo
  mauvais pour apprendre 9
vie
  est un processus quantique 18
  et la physique quantique 16, 232
vieillissement 32
vin
  et eau 168
  verre de 81
virtuel
  photon 72
virtuelle
  particule, définition 219
virtuelle
  particule 72
vitesse
  de la lumière *c*
  physique et 8
  de Planck 237
  maximale
  voir vitesse de la lumière *c*
  valeurs propres de la 119
vitesse
  de groupe 105
  de libération 210
Voie lactée
  masse de la 249
  taille de la 249
  âge de la 249
voiture
  et garage 108
  sur l'autoroutes 87
  voleur de 108
volt 235
volume
  de cohérence 67
volume
  molaire 246
Von Klitzing
  constante de 246
von Neumann
  équation de 164
voyages dans le temps 30
vérité 146
  fondamentale 232

W

watt 235
weber 235
weko 236
Wekta 236
Wheeler-DeWitt
  équation de 192
Wien
  constante de la loi du déplacement de 230, 247

X

xenno 236
Xenta 236

Y

yocto 236
Yotta 236

Z

zepto 236
Zetta 236

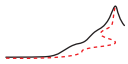
âge du Soleil 248
âme 226
écart type
  illustration 242
écart type 241
échelle
  de longueur 228
  de temps 229
écoulements
  doivent fluctuer 83
  sont constitués de particules 84
électrodynamique 257
  quantique 216
électromagnétiques
  système d'unités 238
électromagnétisme
  force de l' 222
électron
  cohérence des 113–114
  facteur de Landé 246
  interférence d' 113
  moment cinétique de 156
  rayon 156
électron 144
  masse de l' 244
  moment magnétique de 246
  rayon classique de 246
  troyen 124
électronium 123
électronvolt 239
  valeur de l' 247
électrostatiques
  système d'unités 238
élémentaire
  particule, définition d'une 142
émotion
  est un processus quantique 18
énergie
  bande d' 145
  de Planck 238
  niveaux d' 209
énergie
  d'ionisation 210
équation
  de Pauli 118
  de Schrödinger 103–105
équation
  d'onde 104
  d'évolution 103
  de Korteweg-de Vries 123
  de von Neumann 164
  de Wheeler-DeWitt 192
  du mouvement de Schrödinger 103
équilibre 165

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

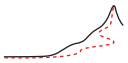
étalement 106
de la fonction d'onde 106
état
comparaison avec la mesure 98–100
est une flèche tournante 100
lié 123
lié, inhabituel 124
quantique 100
état 162, 192
cohérent 53
de Fock 55
de Glauber 53
de nombres 55
fondamental 210
état mixte 164
état propre 100
état pur 163
état quantique 103
états 99
étincelles 196
étoile
couleur d'une 195
étrange
quark 144
évanescente
onde 109
évenements individuels
en mécanique quantique 189
évolution
équation d' 103
évolution
équation du premier ordre 105

Čerenkov
rayonnement 195

œil
et la détection des photons 44



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'aventure de la physique – Vol. IV

Le quantum de changement

Comment peut-on voir des photons individuels?
Comment les couleurs se manifestent-elles dans la nature?
Que signifie «quantique»?
Quels sont les dangers d'une boite de haricots?
Pourquoi les voyages de Gulliver sont-ils impossibles?
L'espace vide est-il vraiment vide?
Quelle est l'origine de la désintégration?
Pourquoi la nature est-elle aléatoire?
Les duplicateurs parfaits existent-ils?

En répondant à ces questions relatives au mouvement, ainsi qu'à bien d'autres, cette série donne une introduction divertissante et convaincante de la physique moderne, une introduction qui apporte des surprises et propose des défis à chacune de ses pages. En partant de la vie quotidienne, cette aventure fournit une vue d'ensemble des résultats modernes en mécanique, en thermique, en électromagnétisme, en relativité, en physique quantique et en théorie d'unification.

Christoph Schiller, PhD, Université libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique. Il a écrit ce livre pour ses enfants ainsi que pour tous les étudiants, enseignants et lecteurs intéressés par la physique, la science du mouvement.

Ce fichier pdf est disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net